

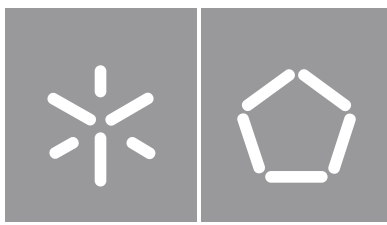


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Rui Martins Freitas
**Fabrico de Microlentes para Aplicação em
MicroLEDs**

João Rui Martins Freitas

**Fabrico de Microlentes para Aplicação em
MicroLEDs**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

João Rui Martins Freitas

**Fabrico de Microlentes para Aplicação em
MicroLEDs**

Dissertação de Mestrado

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de
Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação da

Doutora Sara Pimenta

Direitos de Autor e Condições de Utilização do Trabalho por Terceiros

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer à minha orientadora, Doutora Sara Pimenta, por todo o apoio, orientação, disponibilidade e simpatia ao longo do trabalho desenvolvido durante todo o ano. Não me posso esquecer de agradecer pelo candeeiro novo que não me deixou às escuras durante aquelas últimas fotolitografias e por ter encontrado todas as palavras desaparecidas que a minha cabeça no ar perdeu durante a escrita do documento. Eu juro que nunca mais me esqueço dos artigos definidos quando estiver a escrever qualquer coisa.

Em segundo lugar, um agradecimento muito especial ao Doutor João Ribeiro, pelo empurrão e motivação inicial, e por dar as melhores indicações ao longo desta prova de orientação cheia de bifurcações, cruzamentos e caminhos sem saída. Fico-lhe eternamente grato e espero que essas pizzas em Itália sejam assim tão boas como se diz.

A todos os colegas de laboratório, um muito obrigado por todo o apoio dado durante as etapas de fabrico e caracterização, excelente ambiente de trabalho e momentos de descontração ao longo deste ano. Sem esquecer o pessoal do SEMAT pelas análises SEM e dos 3B's pelas análises AFM.

A todos os amigos, antigos e novos, agradeço-vos por todos os momentos que vivemos em conjunto ao longo destes anos, muito obrigado. Que o ajuntamento anual na barragem da Queimadela dure para todo o sempre.

Por fim, mas em primeiro lugar no meu coração, aos meus avós, pais, irmão, cunhada e afilhado, a minha profunda e eterna gratidão por nunca deixarem de acreditar, motivar e me apoiar ao longo desta jornada da minha vida, por muito complicada que ela tenha sido, vocês em especial foram a minha pedra basilar e viga mestra.

A investigação foi suportada pelo projeto *OpticalBrain* PTDC/CTM-REF/28406/2017, código de operação POCI-01-0145-FEDER-028406. Em setembro de 2019 iniciei uma bolsa de investigação com a referência UMINHO/BI/260/2019, no projeto UID/EEA/04436/2019.

“Our mistakes make us who we are.” – Sheryl Chee/Victoria Kruger/Isabela

Declaração de Integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

Fabrico de Microlentes para Aplicação em MicroLEDs

As matrizes de microelétrodos enfrentam os desafios da neurociência no sentido de melhorar o conhecimento sobre o cérebro, permitindo assim catalisar novos tratamentos para os distúrbios neuropsiquiátricos, como a depressão, a Doença de Parkinson, a Doença de Alzheimer, etc.

Em 2005, surgiu uma nova interação com o cérebro intitulada de optogenética. As sondas neuronais usadas nesta nova interação são designadas de *optrodes*. Estas sondas são otimizadas para fazer incidir luz sobre uma população de células geneticamente modificadas, de modo a revelarem efeitos biológicos específicos quando expostas à luz. Os neurónios-alvo são alterados para produzir proteínas sensíveis à luz conhecidas como opsinas. Estas opsinas requerem uma irradiação mínima de 1 mW/mm^2 para serem ativadas. Devido ao requisito de irradiação mínima, é necessário um aumento da corrente fornecida aos microLEDs incorporados nas *optrodes*, o que irá causar dois efeitos indesejáveis: o aumento do consumo energético e o sobreaquecimento do tecido do sistema nervoso central (SNC). A incorporação de microlentes em conjunto com microLEDs irá causar o efeito de colimação da luz, o que por sua vez irá aumentar a irradiação dos neurónios-alvo, sem aumentar o consumo energético dos microLEDs e minimizando o sobreaquecimento do tecido do SNC.

O principal foco desta dissertação relaciona-se com a simulação, desenvolvimento e caracterização de microlentes em PDMS para serem usadas em conjunto com microLEDs. As técnicas de microfabricação utilizadas para o fabrico das microlentes foram: a fotolitografia e o refluxo térmico de polímeros fotosensíveis para a criação do molde mestre; e a moldagem de réplicas de PDMS para a criação do molde negativo e das microlentes finais em PDMS.

Foram simulados, fabricados e caracterizados dois conjuntos distintos de microlentes em PDMS, com alturas e diâmetros diferentes, sendo que os melhores resultados foram obtidos com o segundo conjunto de microlentes. As estruturas fabricadas, incluindo as microlentes em PDMS, foram caracterizadas utilizando os métodos de perfilometria de contacto, perfilometria ótica 3D, microscopia de força atómica (AFM) e microscopia eletrónica de varrimento (SEM). A caracterização do segundo conjunto de microlentes em PDMS permitiu determinar experimentalmente uma altura aproximada de $55 \mu\text{m}$, um diâmetro aproximado de $81 \mu\text{m}$ e uma rugosidade média (R_a) superficial de aproximadamente 30 nm . Através de cálculos baseados na Ótica Gaussiana foram obtidas as seguintes características para o segundo conjunto de microlentes fabricadas em PDMS: uma distância focal (f) de $95,94 \mu\text{m}$, uma abertura numérica (NA) de $0,42$ e um número focal ($f/\#$) de $1,189$.

Palavras-chave: colimação, microLEDs, microlentes, optogenética

Abstract

Microlenses Fabrication for MicroLEDs Application

Microelectrodes arrays face the neuroscience challenges, trying to improve the knowledge about the brain and allowing the development of new treatments for neuropsychiatric disorders, such as depression, Parkinson's disease, Alzheimer's disease, etc.

In 2005, a new method of interaction with the brain emerged, the optogenetics. The neural probes used in these new method of interaction are named optrodes. These probes are optimized to deliver light to a population of genetically modified neurons, triggering a specific biological response when exposed to light. The targeted neurons are genetically modified to express light-sensitive proteins known as opsins. These opsins require at least $1 \text{ mW}/\text{mm}^2$ of light intensity for activation. Due to the minimum light intensity requirement, the microLEDs incorporated on the optrodes require an increase in the current delivered to them, which will cause two undesired effects: an increase in power consumption and the overheating of the central nervous system (CNS) tissue. The integration of microlenses with microLEDs will collimate the emitted light, increasing the irradiance on the targeted neurons, without increasing the microLEDs power consumption and minimizing the overheating of the CNS tissue.

The main goal of this dissertation is related with the simulation, development, and characterization of PDMS microlenses to be used with microLEDs. The microfabrication techniques used to fabricate the microlenses were: photolithography and thermal reflow of photoresists to develop the master mold; and PDMS replica molding to develop the PDMS negative mold and final microlenses.

Two distinct sets of PDMS microlenses were simulated, fabricated and characterized, with different heights and diameters, in which the best results were obtained with the second set of microlenses. The fabricated structures, including the PDMS microlenses, were characterized using several methods: contact profilometry, 3D optical profilometry, atomic force microscopy (AFM), and scanning electron microscopy (SEM). The characterization of the second set of microlenses allowed to obtain, experimentally, a height of approximately $55 \mu\text{m}$, a diameter of approximately $81 \mu\text{m}$, and an average surface roughness (R_a) of approximately 30 nm . Performing calculations based on Gaussian Optics, it was obtained the following characteristics for the second set of fabricated PDMS microlenses: a focal length (f) of $95.94 \mu\text{m}$, a numerical aperture (NA) of 0.42 , and a f-number ($f/\#$) of 1.189 .

Keywords: collimation, microLEDs, microlenses, optogenetics

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Cérebro Humano: Fisiologia e Principais Distúrbios	1
1.2	Sondas Neurais	5
1.3	Motivação e Objetivos	9
1.4	Organização da Dissertação	10
2	Microlentes	12
2.1	Refração à Escala Microscópica	12
2.2	Estado da Arte	13
2.3	Fundamentos Teóricos	19
2.3.1	Refração em Superfícies Esféricas	19
2.3.2	Lentes Esféricas	22
2.3.3	Equações de Lentes Finas	24
2.3.4	Aberrações Monocromáticas e Aberração Cromática	25
2.3.4.1	Aberração Esférica	25
2.3.4.2	Aberração Coma	27
2.3.4.3	Estigmatismo	28
2.3.4.4	Curvatura de Campo	28
2.3.4.5	Distorção	30
2.3.4.6	Aberração Cromática	31
3	Simulações FEM de Microlentes	32
3.1	Pré-requisitos das Simulações	32
3.2	Microlentes Simétricas	34
3.2.1	Microlentes Simétricas em PDMS com Altura de 10 μm e Diâmetro de 75 μm	35

3.2.2	Microlentes Simétricas em PDMS com Altura de 40 μm e Diâmetro de 75 μm	38
3.3	Microlentes Assimétricas	41
4	Metodologia	45
4.1	Fabrico das Microlentes	45
4.1.1	Fotolitografia	45
4.1.1.1	Fotolitografia com os Polímeros Fotossensíveis <i>AZ[®] 4562</i> e <i>AZ[®] 5214E</i>	50
4.1.1.2	Fotolitografia com os Polímeros Fotossensíveis <i>AZ[®] 40 XT</i> e <i>AZ[®] MIR 701</i>	54
4.1.2	Refluxo Térmico	59
4.1.2.1	Refluxo Térmico do Molde Mestre Fabricado com os Polímeros Fotossensíveis <i>AZ[®] 4562</i> e <i>AZ[®] 5214E</i>	59
4.1.2.2	Refluxo Térmico do Molde Mestre Fabricado com os Polímeros Fotossensíveis <i>AZ[®] 40 XT</i> e <i>AZ[®] MIR 701</i>	60
4.1.2.3	Refluxo Térmico com Inclinação do Molde Mestre Fabricado com os Polímeros Fotossensíveis <i>AZ[®] 40 XT</i> e <i>AZ[®] MIR 701</i>	61
4.1.3	Moldagem de Réplicas	63
4.1.3.1	Processo de Criação do Molde Negativo em PDMS	64
4.1.3.2	Processo de Criação das Microlentes em PDMS	65
4.2	Métodos de Caracterização das Estruturas Fabricadas	66
4.2.1	Perfilometria de Contacto	67
4.2.2	Perfilometria Ótica 3D	67
4.2.3	Microscopia de Força Atómica (AFM)	68
4.2.4	Microscopia Eletrónica de Varrimento (SEM)	70
5	Resultados Experimentais	71
5.1	Resultados Obtidos com os Polímeros Fotossensíveis <i>AZ[®] 4562</i> e <i>AZ[®] 5214E</i>	71
5.2	Resultados Obtidos com os Polímeros Fotossensíveis <i>AZ[®] 40 XT</i> e <i>AZ[®] MIR 701</i>	76
5.3	Resultados Obtidos com os Polímeros Fotossensíveis <i>AZ[®] 40 XT</i> + <i>AZ[®] MIR 701</i> e com Inclinação	82
6	Conclusões e Trabalho Futuro	84
6.1	Conclusões	84
6.2	Trabalho Futuro	86

Bibliografia

87

Siglas e Acrónimos

ACA	Aberração Cromática Axial
AFM	Microscopia de Força Atômica
ChR2	<i>Channelrhodopsin-2</i>
CMEMS	<i>Center of MicroElectroMechanical Systems</i>
CMOS	Semicondutor Óxido de Metal Complementar
DNQ	Diazonaftoquinona
FEM	Método de Elementos Finitos
HR	<i>Halorhodopsin</i>
IPA	Isopropanol
IV	Infravermelha
LCA	Aberração Cromática Lateral
LED	Díodo Emissor de Luz
LIGA	Litografia Galvânica
LSA	Aberração Esférica Longitudinal
MEMS	Sistemas Micro Eletromecânicos
NA	Abertura Numérica
OMS	Organização Mundial da Saúde

OPL	Distância de Caminho Ótico
PDMS	<i>Polydimethylsiloxane</i>
PEB	Cura Pós-Exposição
SA	Aberração Esférica
SEM	Microscopia Eletrónica de Varrimento
SNC	Sistema Nervoso Central
STM	Microscopia de Varrimento com Efeito de Túnel
TSA	Aberração Esférica Transversal
UE	União Europeia
UV	Ultravioleta

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade (SI)
S	Fonte Pontual	-
P	Ponto Focal	-
R	Raio de Curvatura	m
D	Diâmetro de Abertura	m
f	Distância Focal	m
R_a	Rugosidade Média	m
$f/\#$	Número Focal	-
n	Índice de Refração	-
θ	Ângulo de Incidência da Luz num Meio	°
F_i	Foco Paraxial	-
F_T	Foco Tangencial	-
F_S	Foco Sagital	-
Σ_{LC}	Círculo de Menor Confusão	-
Σ_i	Plano de Imagem	-
Σ_P	Superfície Petzval	-
Σ_T	Superfície Tangencial	-
Σ_S	Superfície Sagital	-
\varnothing	Diâmetro	m
I_v	Intensidade Luminosa	cd
ϕ_v	Fluxo Luminoso	lm
Ω	Ângulo Sólido	sr
ϕ_e	Fluxo Radiante	W
E_e	Irradiância	W/m ²

Lista de Símbolos

λ	Comprimento de Onda da Luz	m
$V(\lambda)$	Curva Espectral da Eficiência Luminosa	-
T_g	Temperatura de Transição Vítrea	°C
Au	Ouro	-
Pd	Paládio	-

Lista de Figuras

1.1	Configuração dos lobos presentes no córtex cerebral humano	2
1.2	Diagramas de diferentes tipos de neurónios e estrutura básica	4
1.3	Matriz de microfios de 64 canais	6
1.4	Sondas de Michigan de haste singular e haste múltipla	6
1.5	Diferentes configurações da matriz de Utah	7
1.6	Diferentes categorias de <i>optrodes</i> usadas em optogenética	9
2.1	Corte transversal de um sistema ótico	12
2.2	Primeiras microlentes fabricadas	13
2.3	Conjunto de microlentes fabricadas através de litografia em escala de cinzento	14
2.4	Conjunto microlente e LED para utilização em microssistemas de biopsia ótica	14
2.5	Esquemático do processo de fabrico de um conjunto de microlentes assimétricas	16
2.6	Microlente assimétrica em PDMS com uma inclinação de 32°	16
2.7	Exemplos de estruturas fabricadas em PDMS	17
2.8	Esquemático do processo de criação de microlentes em resina curável por luz UV, através de moldes negativos em PDMS	18
2.9	Conjunto de microlentes fabricadas por Sun <i>et al</i>	18
2.10	Esquemático de Descartes para deduzir a Lei da Refração	19
2.11	Esquemático da refração de uma onda	20
2.12	Representação de tipos de lentes	22
2.13	Relação entre distância focal e raio de curvatura de uma lente	24
2.14	Aberração esférica resultante de uma superfície esférica	26
2.15	Aberração esférica causada por uma lente plano-convexa	26
2.16	Representação da aberração coma negativa e positiva	27
2.17	Representação da aberração coma	27

2.18	Representação esquemática de estigmatismo	28
2.19	Representação esquemática da aberração curvatura de campo	29
2.20	Efeito de curvatura de campo numa superfície plana a distâncias diferentes	29
2.21	Representação das superfícies de imagem tangencial, sagital e Petzval	30
2.22	Efeito de distorção positiva e negativa numa matriz quadrangular	31
2.23	Representação de aberração cromática	31
3.1	Dimensões de dois modelos de microlentes simétricas desenhadas em <i>SOLIDWORKS</i> .	35
3.2	Malha aplicada ao modelo de microlente com altura de 10 μm e diâmetro de 75 μm . .	35
3.3	Resultado da simulação de traçado dos raios de luz de uma microlente em PDMS com altura de 10 μm e diâmetro de 75 μm	36
3.4	Resultado da simulação para a determinação da distância focal de uma microlente em PDMS com altura de 10 μm e diâmetro de 75 μm	37
3.5	Resultado da simulação de irradiância num detetor posicionado à distância focal de uma microlente em PDMS com altura de 10 μm e diâmetro de 75 μm	37
3.6	Malhas aplicadas ao modelo de microlente com altura de 40 μm e diâmetro de 75 μm , detetor e parede traseira	38
3.7	Resultado da simulação de traçado dos raios de luz de uma microlente em PDMS com altura de 40 μm e diâmetro de 75 μm	39
3.8	Resultado da simulação de irradiância num detetor atingido por um feixe de luz colimada por uma microlente em PDMS com altura de 40 μm e diâmetro de 75 μm	40
3.9	Resultado da simulação para a determinação da distância focal de uma microlente em PDMS com altura de 40 μm e diâmetro de 75 μm	40
3.10	Resultado da simulação de irradiância num detetor posicionado à distância focal de uma microlente em PDMS com altura de 40 μm e diâmetro de 75 μm	41
3.11	Aspeto e dimensões do modelo de microlente assimétrica desenhada em <i>SOLIDWORKS</i>	41
3.12	Malha aplicada ao modelo de microlente assimétrica	42
3.13	Resultado da simulação de traçado dos raios de luz de uma microlente assimétrica em PDMS	43
3.14	Resultado da simulação para a determinação da distância focal de uma microlente as- simétrica em PDMS	43
3.15	Resultado da simulação de irradiância num detetor posicionado à distância focal de uma microlente assimétrica em PDMS	44

4.1	Esquemático da sequência de processo de polímeros fotossensíveis positivos, negativos e inversão de imagem	46
4.2	Banho ultrassônico usado na remoção de impurezas orgânicas do substrato	47
4.3	Equipamento de <i>spin coating</i> <i>Polos Spin 150</i> da <i>SPS</i> usado no revestimento do substrato por polímero fotossensível	47
4.4	Placa de aquecimento <i>Präitherm PZ23-2</i> da <i>Harry Gestigkeit GmbH</i> usada na cura do polímero fotossensível	48
4.5	Comportamento dos polímeros fotossensíveis finos e espessos quando expostos a luz UV	49
4.6	Equipamento <i>Karl Suss MJB3</i> usado na exposição do polímero fotossensível	49
4.7	Placa de aquecimento e agitação magnética <i>Agimixt</i> da <i>JP Selecta</i> usada na revelação do polímero fotossensível	50
4.8	Máscara utilizada no processo fotolitográfico com padrões circulares com 75 µm de diâmetro impressa em fotolito	53
4.9	Estruturas cilíndricas obtidas no fim do processo fotolitográfico com os polímeros <i>AZ[®] 4562</i> e <i>AZ[®] 5214E</i>	53
4.10	Esquemático do processo fotolitográfico para a criação do molde mestre com recurso a <i>AZ[®] 4562</i> e <i>AZ[®] 5214E</i>	54
4.11	Efeito de diferentes tempos de exposição em diferentes amostras de <i>AZ[®] 40 XT</i> durante o seu processo de otimização	55
4.12	Exemplos da incompatibilidade dos polímeros <i>AZ[®] 40 XT</i> e <i>AZ[®] 5214E</i> após a revelação	56
4.13	Estruturas cilíndricas obtidas no fim do processo fotolitográfico com os polímeros <i>AZ[®] 40 XT</i> e <i>AZ[®] MIR 701</i>	58
4.14	Esquemático do processo fotolitográfico para a criação do molde mestre com recurso a <i>AZ[®] 40 XT</i> e <i>AZ[®] MIR 701</i>	59
4.15	Perfil térmico usado na placa de aquecimento para o refluxo térmico do <i>AZ[®] 4562</i>	60
4.16	Refluxo térmico do molde mestre fabricado em <i>AZ[®] 4562</i> e <i>AZ[®] 5214E</i>	60
4.17	Perfil térmico usado na placa de aquecimento para o refluxo térmico do <i>AZ[®] 40 XT</i>	61
4.18	Refluxo térmico do molde mestre fabricado em <i>AZ[®] 40 XT</i> e <i>AZ[®] MIR 701</i>	61
4.19	Suportes fabricados em alumínio para efetuar refluxo térmico de amostras com diferentes inclinações	62
4.20	Refluxo térmico do molde mestre fabricado em <i>AZ[®] 40 XT</i> e <i>AZ[®] MIR 701</i> com inclinação	62
4.21	Processo de criação de moldes negativos em PDMS	63

4.22	Bomba de vácuo <i>Varian DS 120</i> da <i>Agilent Technologies</i> e câmara de vácuo usadas na remoção de bolhas de ar presas	64
4.23	Esquemático do processo de fabrico do molde negativo em PDMS com recurso a um molde mestre	65
4.24	Esquemático do processo de fabrico de microlentes em PDMS com recurso a um molde negativo em PDMS	66
4.25	Artefactos causados durante uma análise topográfica por perfilometria de contacto . . .	67
4.26	Esquemático da interferometria de luz branca	68
4.27	Esquemático de um equipamento AFM	69
4.28	Curva van der Waals com regiões e modos de funcionamento de um equipamento AFM	69
4.29	Esquemático de um equipamento SEM	70
5.1	Perfilometria de contacto das diferentes estruturas fabricadas (molde mestre, molde negativo e microlente em PDMS) a partir dos polímeros fotossensíveis <i>AZ[®] 4562</i> e <i>AZ[®] 5214E</i>	72
5.2	Perfilometria ótica 3D do molde mestre, pré e pós refluxo térmico, fabricados a partir dos polímeros fotossensíveis <i>AZ[®] 4562</i> e <i>AZ[®] 5214E</i>	73
5.3	Análise AFM das diferentes estruturas fabricadas a partir dos polímeros fotossensíveis <i>AZ[®] 4562</i> e <i>AZ[®] 5214E</i>	74
5.4	Imagens SEM do molde mestre, pré e pós refluxo térmico, fabricados a partir dos polímeros fotossensíveis <i>AZ[®] 4562</i> e <i>AZ[®] 5214E</i>	75
5.5	Perfilometria de contacto das diferentes estruturas fabricadas a partir dos polímeros fotossensíveis <i>AZ[®] 40 XT</i> e <i>AZ[®] MIR 701</i>	78
5.6	Perfilometria ótica 3D do molde mestre pré refluxo térmico, fabricado a partir dos polímeros fotossensíveis <i>AZ[®] 40 XT</i> e <i>AZ[®] MIR 701</i>	79
5.7	Análise AFM do molde mestre pós refluxo térmico e da microlente em PDMS, fabricados a partir dos polímeros fotossensíveis <i>AZ[®] 40 XT</i> e <i>AZ[®] MIR 701</i>	79
5.8	Imagens SEM do molde mestre pós refluxo térmico e microlentes em PDMS, fabricados a partir dos polímeros fotossensíveis <i>AZ[®] 40 XT</i> e <i>AZ[®] MIR 701</i>	81
5.9	Padrões de interferência criados através da incidência de um laser nas microlentes em PDMS, fabricadas a partir dos polímeros fotossensíveis <i>AZ[®] 40 XT</i> e <i>AZ[®] MIR 701</i> . . .	82
5.10	Imagens SEM do molde mestre pós refluxo térmico com inclinação aplicada de 90°, fabricadas a partir dos polímeros fotossensíveis <i>AZ[®] 40 XT</i> e <i>AZ[®] MIR 701</i>	83

Lista de Tabelas

2.1	Convenção sinalética para superfícies refratoras esféricas e lentes finas com incidência de luz da esquerda para a direita	22
2.2	Definição e corte transversal de lentes com variações dos seus raios	23
4.1	Parâmetros de configuração do equipamento de <i>spin coating</i> para obter um filme de 1,14 μm de espessura de AZ [®] 5214E.	51
4.2	Parâmetros de configuração do equipamento de <i>spin coating</i> para obter um filme de 10 μm de espessura de AZ [®] 4562.	52
4.3	Parâmetros de configuração do equipamento de <i>spin coating</i> para obter um filme de 0,8 μm de espessura de AZ [®] MIR 701.	57
4.4	Parâmetros de configuração do equipamento de <i>spin coating</i> para obter um filme de 40 μm de espessura de AZ [®] 40 XT.	57

Capítulo 1

Introdução

O presente capítulo apresenta a fisiologia e os principais distúrbios que afetam o cérebro humano atualmente. Para além disso, é apresentada a evolução ao longo dos anos das sondas neuronais, desde os microelétrodos *single wire* até às *optrodes*, usados na compreensão do funcionamento do cérebro. Para terminar, apresentam-se a motivação e objetivos da presente dissertação e ainda a organização deste documento.

1.1 Cérebro Humano: Fisiologia e Principais Distúrbios

As funções do cérebro estão intimamente relacionadas com o nosso comportamento e personalidade, sendo estas as qualidades que mais nos identificam como humanos. Os nossos membros e alguns órgãos podem ser danificados, removidos ou transplantados sem afetar as nossas qualidades humanas, mas um ínfimo dano cerebral pode modificar radicalmente a nossa consciência, percepção, comportamento ou personalidade [1].

O cérebro humano partilha a configuração básica e disposição funcional com outros mamíferos. Contudo, o cérebro humano comparativamente com o cérebro dos roedores é enorme e complexo. O cérebro humano divide-se em dois hemisférios, esquerdo e direito, cada um com funções especializadas. Em pessoas destras, a linguagem e o cálculo são quase exclusivamente ligadas a regiões do hemisfério esquerdo, enquanto que a percepção espacial está fortemente relacionada com o hemisfério direito. No caso das pessoas esquerdinas, a localização destas funções nos hemisférios encontra-se invertida. Quando os dois hemisférios analisam estímulos semelhantes, os resultados obtidos são normalmente diferentes. A análise do hemisfério esquerdo tende a focar-se nas componentes individuais do estímulo, enquanto que

a análise do hemisfério direito tende a focar-se no aspeto geral do estímulo [1].

Cada um dos hemisférios é constituído por quatro lobos: frontal, parietal, temporal e occipital. A fissura lateral e sulco central servem como limite entre os lobos frontal, temporal e parietal. O limite entre o lobo occipital, parietal e temporal é uma linha arbitrária. O lobo frontal, como em todos os outros primatas, contém as áreas de controlo motor. Contudo, a maior parte do lobo frontal humano contém funções associadas a comportamentos complexos, relacionados com o comportamento social e personalidade individual, sendo também a localização de uma das áreas associadas à linguagem, designada por área de Broca. O lobo parietal contém o córtex somatossensorial, responsável pelo processamento sensorial tátil e proprioceptiva, que contribui para uma perceção consciente da posição do corpo. Partes do lobo temporal, em conjunto com partes do lobo parietal, definem a segunda área associada à linguagem, designada por área de Wernicke. O lobo temporal é também composto pelas áreas responsáveis pelo reconhecimento facial, hipocampo, sendo este responsável pela memória, córtex auditivo e córtex olfativo. O lobo occipital é ocupado maioritariamente pelo córtex visual primário, responsável pela receção e processamento visual, e pelo córtex visual secundário, responsável pela associação visual [1]. A configuração dos lobos presentes no córtex cerebral humano pode ser vista na figura 1.1.

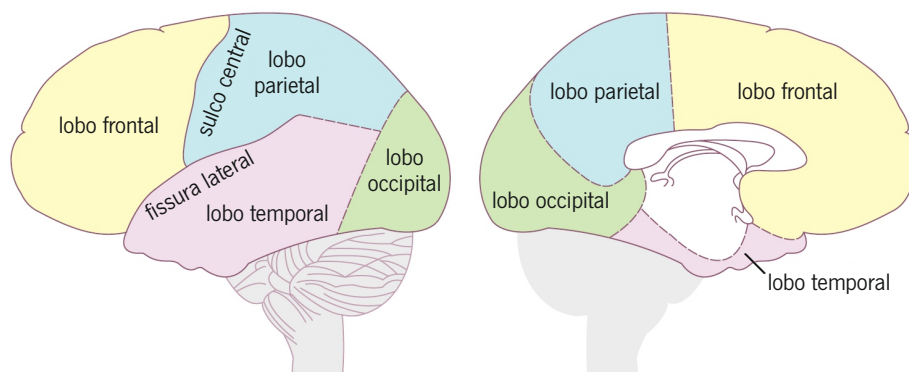


Figura 1.1: Configuração dos lobos presentes no córtex cerebral humano. O diagrama da esquerda mostra uma vista lateral da configuração dos lobos presentes no córtex cerebral humano. O diagrama da direita mostra uma vista sagital da configuração dos lobos presentes no córtex cerebral humano (adaptado de [1]).

O cérebro é composto por dois tipos de células, neurónios e células da glia. Um neurónio típico possui dendrites, que recebem informação de outros neurónios ou de recetores sensoriais, e um único axónio, que transporta sinais para outros neurónios ou músculos. Os axónios podem variar de tamanho desde muito curtos a muito longos, podendo atingir metade do comprimento do corpo de um animal. Quando o sinal elétrico alcança o fim do axónio, um transmissor químico é libertado, influenciando um segundo neurónio. Existem neurónios com diferentes formas e tamanhos. Alguns possuem corpos celulares grandes a rondar os 50 μm , outros possuem corpos celulares pequenos a rondar os 10 μm [1].

O segundo tipo de células presentes no sistema nervoso são as células da glia. Originalmente, pensava-se que as células da glia possuíam funções nutritivas e protetoras, mas o conhecimento do seu papel expandiu consideravelmente nos últimos anos. As células da glia são agora vistas como parceiras funcionais dos neurónios, com papéis chave na regulação da atividade neuronal e na comunicação entre neurónios. Vários subtipos de células da glia protegem o cérebro de mudanças químicas, outras proporcionam vigilância imunitária ou alteram as propriedades dos sinais neuronais [1].

As células mantêm o seu ambiente químico interno através do controlo do movimento de iões e moléculas que atravessam as suas membranas. Os neurónios bombeiam grandes quantidades de iões através das suas membranas, produzindo assim uma diferença de potencial entre o interior e o exterior das células, sendo chamado de potencial de membrana. A estimulação de um neurónio pode ativar um grande salto momentâneo no potencial de membrana, chamado de potencial de ação. Um potencial de ação num ponto superficial da célula desencadeia potenciais de ação à sua volta numa reação em cadeia, propagando-se quase instantaneamente através da célula e pelo seu axónio [1].

Os neurónios recebem estímulos nos seus filamentos sensíveis, denominados de dendrites. A membrana que envolve cada dendrite possui pequenos canais que controlam o fluxo de iões positivos e negativos através da membrana. Alguns destes canais de iões são sensíveis a estímulos químicos ou físicos e podem causar diferenças de potencial na membrana. Se um número mínimo de diferenças de potencial na membrana acontecer ao mesmo tempo, é desencadeado um potencial de ação. Quando um potencial de ação é desencadeado, este sinal é transmitido ao longo do axónio. O fim do axónio é dividido em vários ramos terminais, denominados de terminais axónicos. Um potencial de ação causa a libertação de compostos químicos de sinalização pelos terminais axónicos, chamados de neurotransmissores. Estes neurotransmissores estabelecem uma ligação do tipo *key-and-lock* com os recetores na célula alvo. Os recetores são estruturas proteicas concebidas para a receção de transmissores específicos. A combinação dos neurotransmissores com os recetores pode levar à abertura de canais iónicos ou desencadear outras mudanças. Os recetores de neurotransmissores estão maioritariamente localizados nas dendrites. O conjunto dos terminais axónicos de uma célula com os recetores de outra célula cria uma região de área reduzida designada por sinapse [1]. Os diferentes tipos de neurónios podem ser vistos na figura 1.2a e a sua estrutura básica pode ser vista na figura 1.2b.

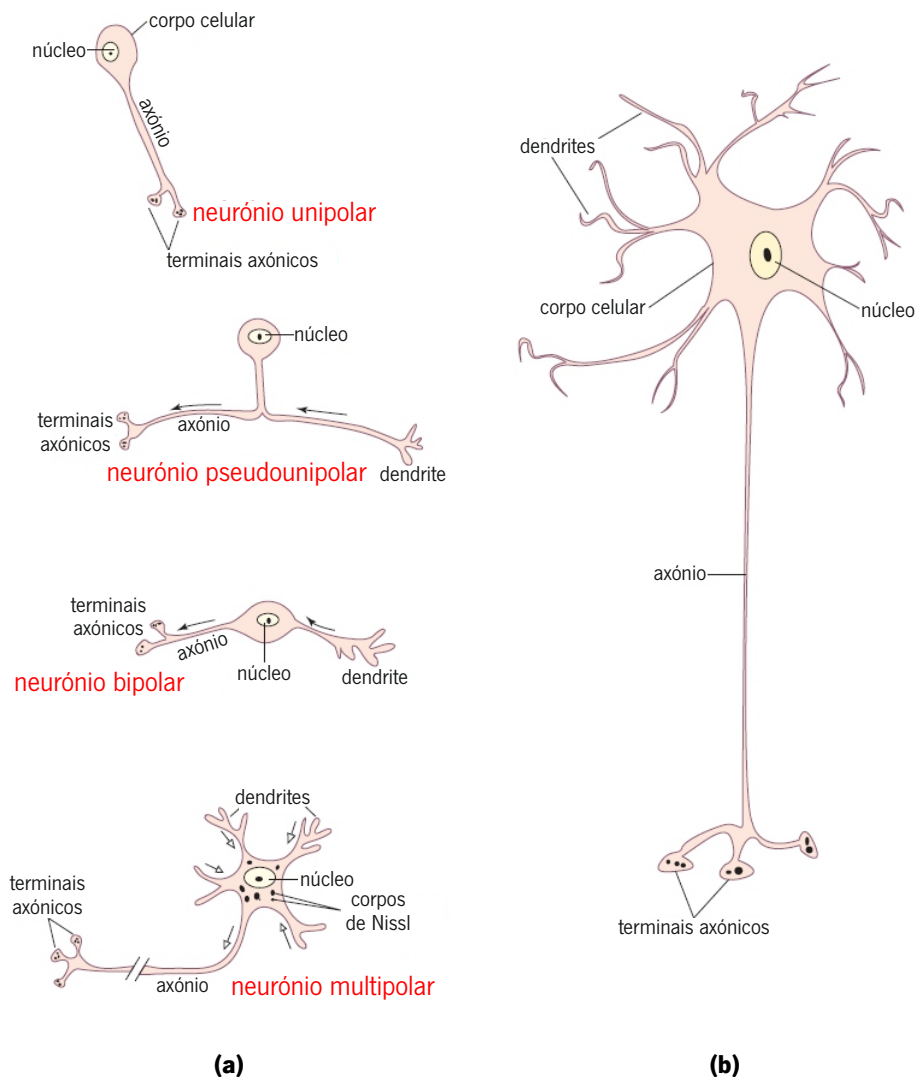


Figura 1.2: Diagramas de diferentes tipos de neurónios e estrutura básica: (a) Os neurónios unipolares possuem um axónio mas não possuem dendrites. Os neurónios pseudounipolares possuem um axónio e uma única dendrite, fundidos no corpo celular. Os neurónios bipolares possuem um axónio e uma única dendrite, enquanto que os neurónios multipolares possuem várias dendrites; (b) O corpo de um neurónio possui várias ramificações de dendrites. O axónio divide-se em vários ramos finos denominados de terminais axónicos, que estabelecem contacto sináptico com outros neurónios ou células musculares (adaptado de [1]).

Quando os neurónios no cérebro ou na coluna espinal são danificados por uma lesão ou doença, o resultado é normalmente muito grave. Primeiro, porque os neurónios e os seus axónios formam o sistema de comando e controlo do corpo, e qualquer dano pode colocar em causa este sistema crucial. Se algumas células musculares forem danificadas, pode haver perda de funções, mas o efeito é contido à região do dano. Contudo, danos numa área muito pequena de um dos hemisférios cerebrais pode paralisar por completo o lado oposto do corpo. Segundo, porque se os neurónios forem destruídos, estes não podem ser substituídos. Noutras partes do corpo, como o fígado ou os rins, as células danificadas

podem ser substituídas por células novas, sendo a sua função mantida [1].

A depressão, a esquizofrenia e os distúrbios de pânico são exemplos de distúrbios mentais, enquanto que a demência, a epilepsia e a esclerose múltipla são distúrbios neurológicos. Ambos os grupos são frequentemente referidos como distúrbios neuropsiquiátricos [2]. Em 2011, Wittchen *et al.* [2] concluíram que mais de um terço da população da União Europeia (UE) sofre de distúrbios mentais, correspondendo a um número estimado de 164,7 milhões de pessoas. O verdadeiro número de distúrbios neuropsiquiátricos, onde se englobam distúrbios mentais e distúrbios neurológicos, é consideravelmente maior. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), a 9 de abril de 2018 foi estimado, a nível global, que 300 milhões de pessoas são afetadas por depressão, 60 milhões afetadas por distúrbio bipolar, 23 milhões afetadas por esquizofrenia e outras psicoses e, por fim, 50 milhões afetadas por demência [3].

1.2 Sondas Neuronais

O primeiro caso documentado do uso de correntes elétricas na tentativa de tratamento de doenças neurológicas, foi realizado em 1757 por Benjamin Franklin em pacientes com paralisia nos membros inferiores [4]. Em 1939, Hodgkin *et al.* [5] demonstraram pela primeira vez o registo de potenciais de ação no interior de uma fibra nervosa. O registo dos potenciais de ação foi efetuado num axónio gigante (500 μm) de uma lula, com recurso a um microelétrodo. Em 1952, Hodgkin *et al.* [6] voltaram a dar outro grande contributo com a descrição analítica do mecanismo de excitação dos nervos e a respetiva geração de potenciais de ação. Ao longo dos anos, as sondas neuronais tornaram-se uma ferramenta chave no registo de potenciais de ação dos neurónios, na estimulação de regiões cerebrais específicas e na compreensão do funcionamento do cérebro [7].

Desde 1950, microelétrodos *single wire* de metal passaram a ser usados consistentemente na gravação de atividade elétrica em ambientes extracelulares. Estes microelétrodos consistem num fio metálico isolado, com exceção da ponta, sendo este o local de registo dos sinais elétricos [7]. Em 1958, Strumwasser [8] registou a descarga de neurónios individuais em esquilos terrestres da Califórnia, por um período de uma semana ou superior, com a implantação de microfios de aço inoxidável isolados, com 80 μm de diâmetro e com isolamento exposto num corte transversal das pontas. Na figura 1.3, pode-se observar uma matriz de microfios de 64 canais.

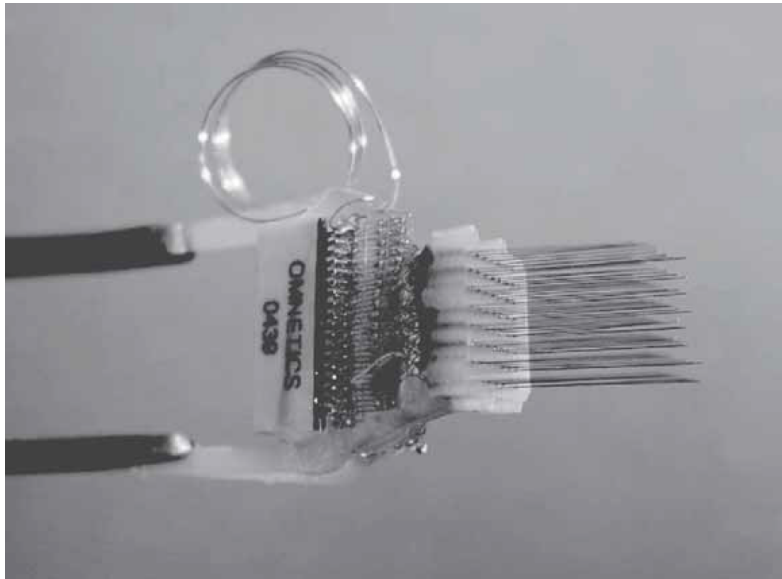


Figura 1.3: Matriz de microfios de 64 canais (retirado de [9]).

Com os avanços das técnicas de microfabricação de circuitos integrados e deposição de filmes finos na década de 1970, Wise *et al.* [10] surgiram com um trabalho pioneiro, a primeira sonda planar multielétrodos, baseada em substrato de silício. Em 1985, Najafi *et al.* [11], baseado em sondas planares desenvolvidas anteriormente, desenvolveram uma sonda planar com tecnologia semicondutor óxido de metal complementar (CMOS), capaz de realizar amplificação e multiplexagem de sinais. Este tipo de configuração designa-se de sonda de Michigan. Na figura 1.4a, encontra-se representado um diagrama da estrutura básica de uma sonda de Michigan de haste singular e na figura 1.4b, uma sonda de Michigan de haste múltipla de 32 canais.

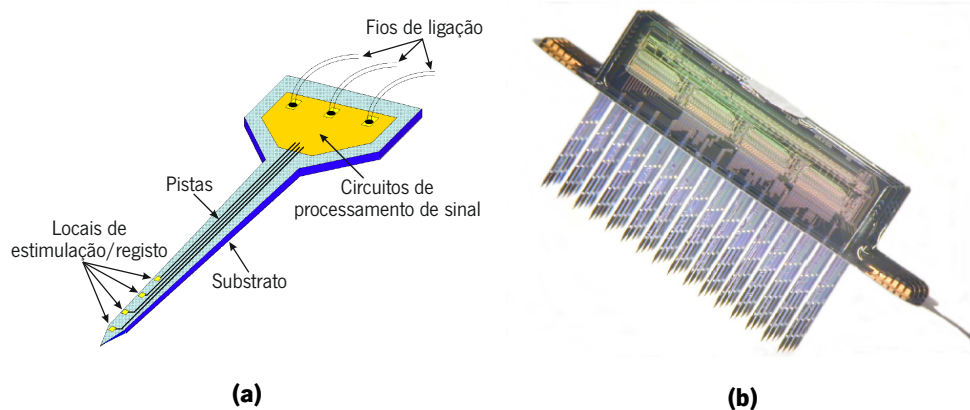


Figura 1.4: Sondas de Michigan de haste singular e haste múltipla: (a) Diagrama da estrutura básica de uma sonda de Michigan de haste singular; (b) Sonda de Michigan de haste múltipla de 32 canais (adaptado de [12]).

Em 1991, Campbell *et al.* [13] desenvolveram um novo método de fabrico, capaz de produzir uma sonda tridimensional com uma matriz de 100 elétrodos, para a implantação no córtex visual felino. Este

tipo de configuração designa-se de matriz de Utah (figura 1.5a). Uma outra configuração da matriz de Utah, designada por matriz de Utah inclinada, apresenta elétrodos de diferentes comprimentos, capaz de estimular ou registar atividade neuronal a diferentes profundidades (figura 1.5b) [14].

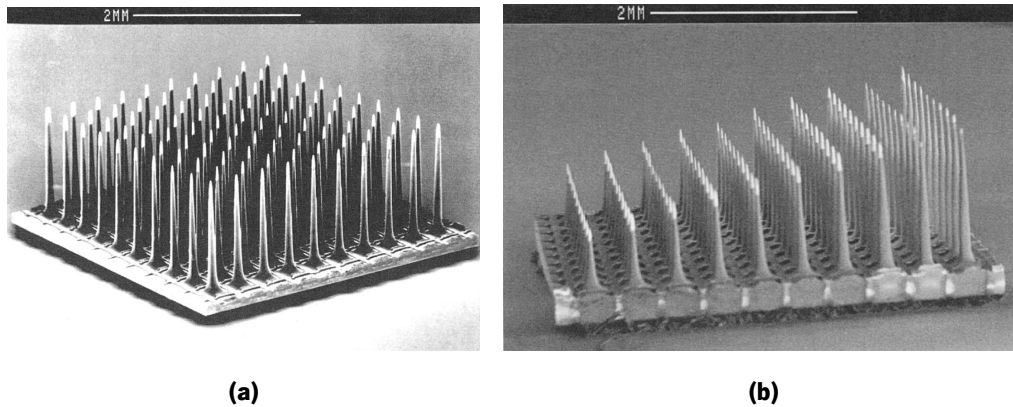


Figura 1.5: Diferentes configurações da matriz de Utah: (a) Matriz de Utah usada na estimulação ou registo de atividade neuronal à mesma profundidade; (b) Matriz de Utah inclinada usada na estimulação ou registo de atividade neuronal a diferentes profundidades (retirado de [14]).

Apesar das sondas neuronais até aqui apresentadas serem convencionalmente usadas no registo e estimulação elétrica dos neurónios e apresentarem bons resultados nos tratamentos terapêuticos, estas falham na especificidade celular, podendo causar efeitos secundários neurofisiológicos [15].

Em 2005, Boyden *et al.* [16] descreveram pela primeira vez o uso da optogenética no controlo ótico geneticamente direcionado da atividade neuronal, numa escala de milissegundos. Um ano mais tarde, Deisseroth *et al.* [17] surgiram com a primeira definição genérica de optogenética. Na edição de janeiro de 2011 da revista científica *Nature Methods*, a optogenética foi escolhida como “Method of the Year 2010”, levando à necessidade de uma definição mais abrangente [18]. Nesse mesmo ano, Karl Deisseroth, criador de técnicas pioneiras de optogenética, definiu a optogenética como a combinação de métodos genéticos e óticos para estimular ou inibir funções em eventos bem definidos em células fotossensíveis de tecido vivo, quando expostas à luz [19].

A optogenética revolucionou a análise do circuito neuronal através da introdução de proteínas fotossensíveis, conhecidas por opsinas, em tipos de células específicas, possibilitando assim respostas bem definidas a um estímulo ótico [16, 19, 20]. Usando um determinado comprimento de onda de luz direcionado a uma opsina específica, a especificidade celular pode ser conseguida com uma resolução temporal bem definida [20]. Devido a esta especificidade, a *halorhodopsin* (HR) e a *channelrhodopsin-2* (ChR2) podem ser expressas no mesmo neurónio alvo, permitindo hiperpolarização e despolarização do potencial da membrana deste, através da utilização de luz amarela ou luz azul, respetivamente [21]. As

sondas neuronais usadas nesta nova interação são designadas de *optrodes*. Estas sondas são otimizadas para fazer incidir luz sobre uma população de células geneticamente modificadas, de modo a revelarem efeitos biológicos específicos quando expostas à luz. As *optrodes* incluem simultaneamente componentes elétricos de registo e componentes óticos de estimulação [22].

Avanços recentes nos métodos de microfabricação, levaram ao desenvolvimento de microestruturas completamente integradas em pequenos dispositivos. Atualmente, existem várias metodologias de *optrodes*, podendo ser classificadas como dispositivos com integração personalizada de fibra ótica, guia de onda ou microLEDs [22]. As *optrodes* com fibra ótica possuem numa ponta um local de fotoestimulação e na ponta oposta uma fonte de luz acoplada (figura 1.6a). As fontes de luz mais usadas são lâmpadas de xénon, díodos emissores de luz (LEDs) e díodos de laser [22]. À semelhança das *optrodes* com fibra ótica, as *optrodes* com guia de onda só proporcionam um local de fotoestimulação por *shank* (figura 1.6b). Contudo, de maneira a aumentar o número de locais de fotoestimulação, as *optrodes* com múltiplas guias de onda são uma possível solução [23]. As *optrodes* com fibra ótica e guia de onda efetuam fotoestimulação através de uma fonte de luz externa. No caso das *optrodes* com microLEDs incorporados (figura 1.6c), a fotoestimulação dos neurónios realiza-se muito próxima das células alvo, maximizando a potência de luz fornecida [24]. As configurações atuais de *optrodes* com microLEDs estão divididas em dispositivos planares para aplicações neuronais superficiais [25] e sondas profundas para estimulação neuronal profunda [20].

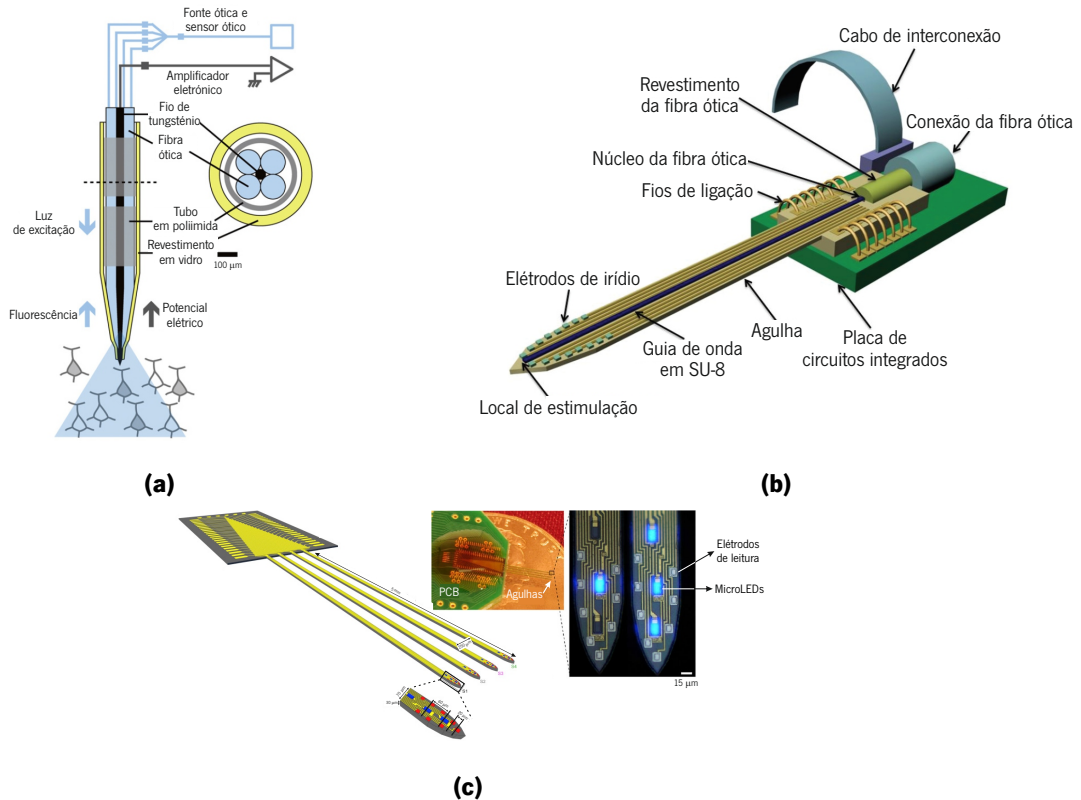


Figura 1.6: Diferentes categorias de *optrodes* usadas em optogenética: (a) Esquemático de uma *optrode* com fibra ótica (adaptado de [26]); (b) Esquemático de uma *optrode* com guia de onda (adaptado de [27]); (c) Esquemático e fotografia de uma *optrode* com microLEDs incorporados (adaptado de [20]).

1.3 Motivação e Objetivos

O uso de sistemas microeletromecânicos (MEMS) na produção de matrizes de microelétrodos capazes de interagir com o sistema nervoso central (SNC) ao nível celular, é uma realidade [22]. As matrizes de microelétrodos enfrentam os desafios da neurociência no sentido de melhorar o conhecimento sobre o cérebro, permitindo catalisar novos tratamentos para distúrbios neuropsiquiátricos, como a Doença de Parkinson, a Doença de Alzheimer e outras demências, a depressão, entre outras [28]. Recentemente surgiu uma nova interação com o cérebro: a optogenética [16]. Os dispositivos optogenéticos são otimizados para fazer incidir luz sobre uma população de células geneticamente modificadas, de modo a revelarem efeitos biológicos específicos quando expostas à luz [19]. Os neurónios-alvo são alterados para produzir proteínas sensíveis à luz conhecidas como opsinas, normalmente a ChR2, com um pico de ação nos 470 nm (luz azul) [16]. Estas opsinas requerem uma irradiação mínima de 1 mW/mm^2 para serem ativadas [25, 29]. Devido ao requisito de irradiação mínima, é necessário um aumento de corrente fornecida aos microLEDs incorporados na sonda neuronal, o que irá causar dois efeitos indesejáveis,

nomeadamente o aumento do consumo energético e o sobreaquecimento do tecido do SNC.

Tipicamente, as leituras da temperatura máxima cerebral efetuadas em pacientes clínicos em repouso são congruentes com a temperatura corporal do paciente (cérebro $36,9 \pm 0,4$ °C, retal $36,9 \pm 0,6$ °C) [30]. O tecido do SNC é extremamente sensível à temperatura. A variação da temperatura e o tempo de exposição são críticos no grau de tolerância e no grau de dano térmico do cérebro [31]. Vários estudos reportam danos cerebrais microscópicos severos em diferentes áreas (corpo estriado, córtex cerebral e tálamo), quando expostas a temperaturas de 39 °C [32], salientando assim o potencial dano do tecido do SNC quando exposto a aumentos de temperatura de 1 °C–2 °C [33].

Ao expor os neurónios-alvo a uma luz gerada pelos microLEDs, o tecido do SNC sofre um aumento de temperatura devido ao efeito de Joule. Assim, o principal foco desta dissertação é o desenho, fabrico e caracterização de microlentes para serem usadas em conjunto com microLEDs. As microlentes irão colimar a luz, aumentando a irradiação de luz nos neurónios-alvo, sem aumentar o consumo energético dos microLEDs e minimizando o sobreaquecimento do tecido do SNC.

Os principais objetivos desta dissertação são:

1. Desenho e simulação de microlentes simétricas e assimétricas;
2. Fabrico de microlentes com recurso a um conjunto de polímeros fotossensíveis e através de técnicas de moldagem de PDMS;
3. Caracterização das estruturas fabricadas, incluindo as microlentes em PDMS.

Esta dissertação está inserida no projeto de investigação *OpticalBrain* e o trabalho decorre nas instalações do centro CMEMS (*Center of MicroElectroMechanical Systems*) da Universidade do Minho.

1.4 Organização da Dissertação

Este documento encontra-se dividido em seis capítulos.

No capítulo 1 é apresentada a fisiologia e os principais distúrbios que afetam o cérebro humano. É apresentada a evolução ao longo dos anos das sondas neuronais, usadas na compreensão do funcionamento do cérebro. Para terminar, é explicada a motivação e os principais objetivos desta dissertação.

No capítulo 2 são apresentados os conceitos teóricos associados às microlentes e ainda o estado da arte acerca dos vários métodos de fabrico das microlentes e as suas aplicações. Irão também ser descritos os fundamentos teóricos associados às lentes.

No capítulo 3 são apresentadas as simulações FEM de diferentes modelos de microlentes simétricas e assimétricas.

No capítulo 4 são apresentadas as metodologias utilizadas no fabrico das microlentes. São também descritos os diferentes métodos usados na caracterização das estruturas fabricadas, incluindo as microlentes.

No capítulo 5 são apresentados e comparados os diferentes resultados experimentais, obtidos através da caracterização das diferentes estruturas desenvolvidas até às microlentes finais em PDMS.

Por fim, no capítulo 6 são abordadas as principais conclusões obtidas ao longo desta dissertação e as perspetivas de trabalho futuro.

Capítulo 2

Microlentes

O presente capítulo apresenta o conceito de microlentes e o estado da arte dos vários métodos de fabrico de microlentes e as suas aplicações. São também descritos os fundamentos teóricos associados às microlentes.

2.1 Refração à Escala Microscópica

Uma lente é um dispositivo refrator que reconfigura a propagação de uma energia, tal como a luz UV, luz IV, luz visível, entre outras. A configuração da lente é definida pela remodelação da onda desejada, sendo representado na figura 2.1 um possível sistema ótico. Quando existe uma fonte pontual, S , é muitas vezes desejável direcionar a luz, evitando assim o enfraquecimento e dispersão do feixe de luz, sendo este conceito aplicável a faróis, lanternas, projetores, entre outros. Outra aplicação é quando se deseja focar uma luz com incidência de raios paralelos num ponto específico, a uma distância específica, designados por ponto focal, P , e distância focal, f . [34].

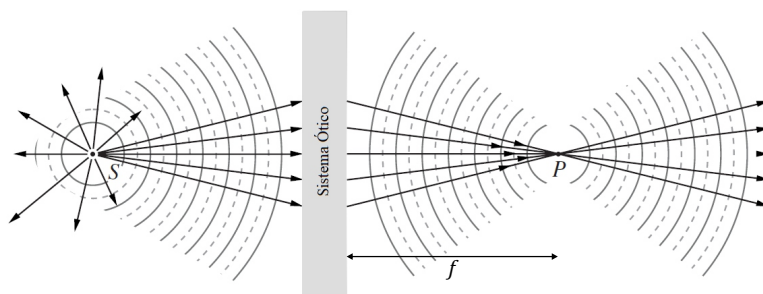


Figura 2.1: Corte transversal de raios com divergência de S e convergência parcial em P (adaptado de [34]).

As microlentes são lentes com diâmetros inferiores a 1 mm, normalmente com dimensões na escala

dos micrómetros [35]. Pode-se ver na figura 2.2 as primeiras microlentes fabricadas em 1988 por Popovic *et al.* [36], com o objetivo de desenvolver um processo de fabrico capaz de produzir microlentes de alta qualidade, usando materiais comuns no fabrico de circuitos integrados. Com esta nova conquista, foi possível desenvolver um grande número de novas aplicações onde são usadas estas estruturas óticas, reduzindo assim a complexidade elétrica e mecânica dos sistemas existentes.

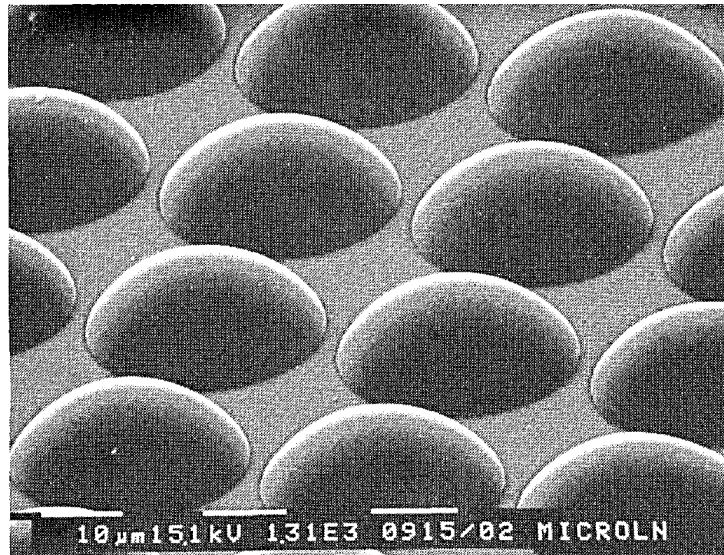


Figura 2.2: Imagem de microscópio de varrimento eletrônico (SEM) do primeiro conjunto de microlentes fabricado por Popovic *et al.* [36].

2.2 Estado da Arte

As microlentes podem ser fabricadas individualmente ou em conjunto, para um diverso tipo de aplicações que podem ir desde dispositivos de iluminação, conexões óticas, imagiologia, sensorização e, mais recentemente, optogenética [24, 35, 37].

Existem diferentes métodos de fabrico de microlentes: elétricos, mecânicos, químicos e óticos. O método elétrico consiste na aplicação de um campo elétrico a cristais líquidos, alterando assim a sua orientação molecular, o que leva à criação de microlentes com gradiente de índice de refração [38]. Os métodos mecânicos são constituídos pelos métodos de *hot embossing* [39], dispensador de microgotículas [40] e microlentes líquidas [41]. Os métodos químicos são constituídos pelos métodos de troca iónica [42], *wet etching* [43] e autoassemblagem de conjuntos de microlentes [44]. Os métodos óticos são constituídos pelos métodos de refluxo térmico de um polímero fotossensível [45], litografia em escala de cinzento [46], técnicas fototérmicas aplicadas a vidro fotossensível [47], técnica de escrita direta [48] e fabricação por laser femtossegundo [49, 50].

Em 2006, Totsu *et al.* [46] fabricaram um conjunto de microlentes, apresentado na figura 2.3, através do método de litografia em escala de cinzento. O objetivo era fabricar diversas microestruturas 3D, usando um método de baixo custo e rápido, requisitos muito importantes no desenvolvimento de MEMS.

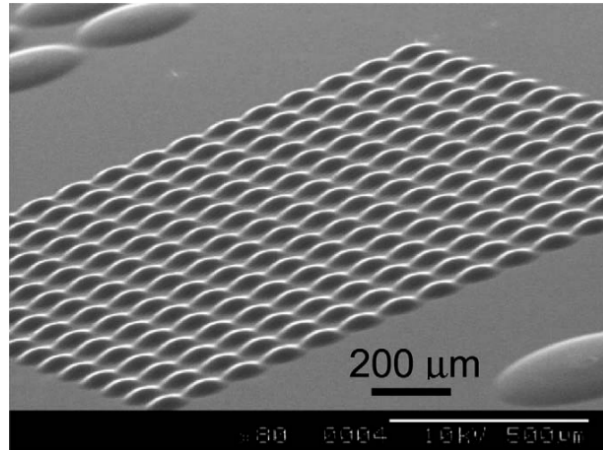


Figura 2.3: Imagem SEM de um conjunto de microlentes fabricadas através de litografia em escala de cinzento por Totsu *et al.* [46].

Em 2017, Ribeiro *et al.* [51] fabricaram uma microlente em cima de um diodo emissor de luz (LED) para aplicação num microssistema de biopsia ótica, apresentado na figura 2.4. O método de fabrico usado no desenvolvimento da microlente foi o *hanging droplet*, recorrendo a uma micro pipeta. A microlente permitiu um aumento de 30% na irradiação, sem aumentar o consumo energético do LED.

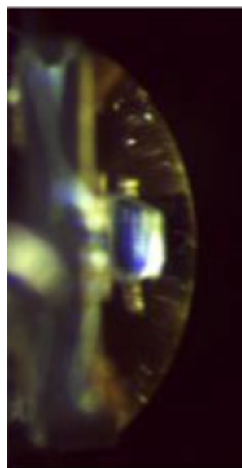


Figura 2.4: Conjunto microlente e LED para utilização em microssistemas de biopsia ótica (retirado de [51]).

Na fabricação de microlentes assimétricas, pode-se salientar três diferentes técnicas por refluxo térmico: (i) inclinação de substratos com diferentes níveis de hidrofobicidade [52], (ii) inclinação de um substrato revestido por dois polímeros fotossensíveis com diferentes temperaturas de transição vítrea (T_g)

[53] e (iii) exposição no *mask aligner* com o substrato inclinado [54]. O método referido em (ii) foi desenvolvido por Hung *et al.* [53]. Comparativamente aos outros métodos enumerados, apresenta algumas vantagens, tais como: (i) necessita apenas de uma única exposição no *mask aligner*, devido aos dois polímeros fotossensíveis serem do tipo positivo e (ii) o formato da base do polímero fotossensível com T_g inferior mantém uma forma circular e não desliza durante o processo de refluxo térmico inclinado. O método descrito por Hung *et al.* foi também usado por Lian *et al.* [45] na fabricação de microlentes semielipsoidais.

O método descrito por Hung *et al.* [53] encontra-se esquematizado na figura 2.5. O primeiro passo consiste no revestimento do substrato por dois polímeros fotossensíveis com T_g diferentes, sendo o polímero na posição inferior o de T_g superior (figura 2.5a). No passo seguinte é usada uma máscara com padrões circulares na exposição no *mask aligner* (figura 2.5b). De seguida, é realizada a revelação, formando-se cilindros dos polímeros fotossensíveis (figura 2.5c). Como passo final, o substrato é inclinado para a formação do formato das microlentes assimétricas, através do efeito da gravidade e do refluxo térmico (figura 2.5d e figura 2.5e). Uma vez que o polímero fotossensível inferior tem uma T_g superior, este não irá sofrer o efeito de refluxo térmico, sendo que apenas o polímero fotossensível superior é afetado. O refluxo térmico é um processo de amolecimento térmico das estruturas reveladas em polímero fotossensível, acima da sua T_g . Através de refluxo térmico, estruturas cilíndricas ou esféricas arredondadas de polímero fotossensível são criadas, podendo ser usadas como microlentes.

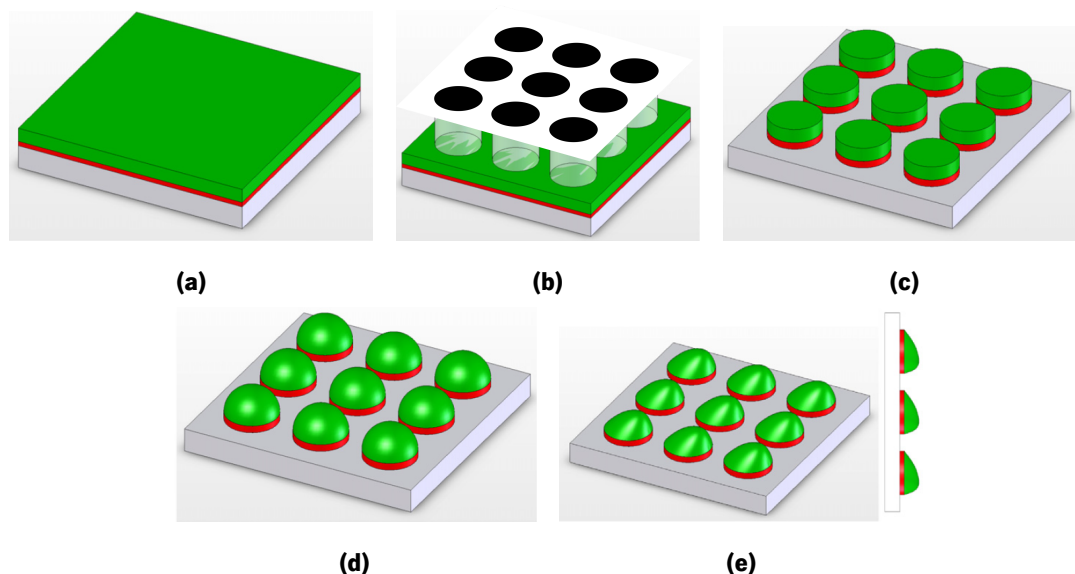


Figura 2.5: Diagrama esquemático do processo de fabricação de um conjunto de microlentes assimétricas (adaptado de [53]): (a) Revestimento do substrato por dois polímeros fotossensíveis, com T_g diferentes; (b) Processo litográfico para padronização do conjunto de microlentes através de uma máscara; (c) Cilindros de polímeros fotossensíveis após revelação; (d) Microlentes simétricas após refluxo térmico; (e) Microlentes assimétricas após refluxo térmico e inclinação do substrato.

Após a criação do molde mestre em polímero fotossensível, segundo o processo desenvolvido por Hung *et al.* [53], foi criado um molde negativo metálico usando uma técnica de moldagem por eletrodeposição. O molde negativo foi depois usado na criação de uma microlente assimétrica em *polydimethylsiloxane* (PDMS) com 32° de inclinação, $18\ \mu\text{m}$ de altura e $80\ \mu\text{m}$ de diâmetro, podendo ser observada na figura 2.6.

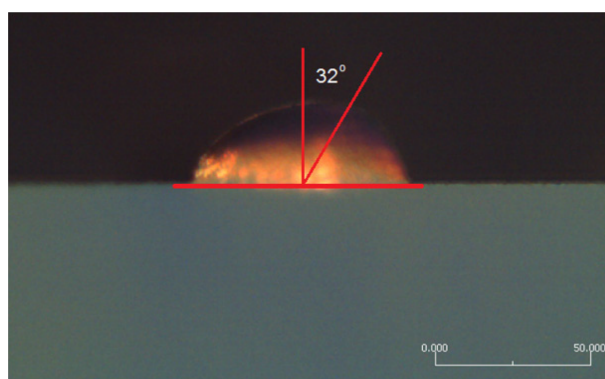


Figura 2.6: Microlente assimétrica em PDMS com uma inclinação de 32° fabricada por Hung *et al.* [53].

O PDMS é um polímero elastômero muito utilizado na fabricação de MEMS, micro dispositivos fluidicos, biossensores e *biochips* [55]. A figura 2.7 apresenta estruturas fabricadas em PDMS. A figura 2.7a apresenta canais microfluidicos e a figura 2.7b um micro cantiléver usado como sensor de fluxo. O

PDMS é uma boa escolha para diversas aplicações pelas seguintes razões: (i) boas características óticas, (ii) material biocompatível, (iii) boa estabilidade química, (iv) boas propriedades de cura térmica, (v) baixa energia de superfície, (vi) boa flexibilidade mecânica e (vii) fácil replicação através de moldes [51, 56, 57]. Como características óticas, salienta-se o seu índice de refração, n , entre os comprimentos de onda da luz de 350 nm e os 700 nm de 1,4 e a elevada transmitância ótica acima dos 280 nm [51, 56, 58].

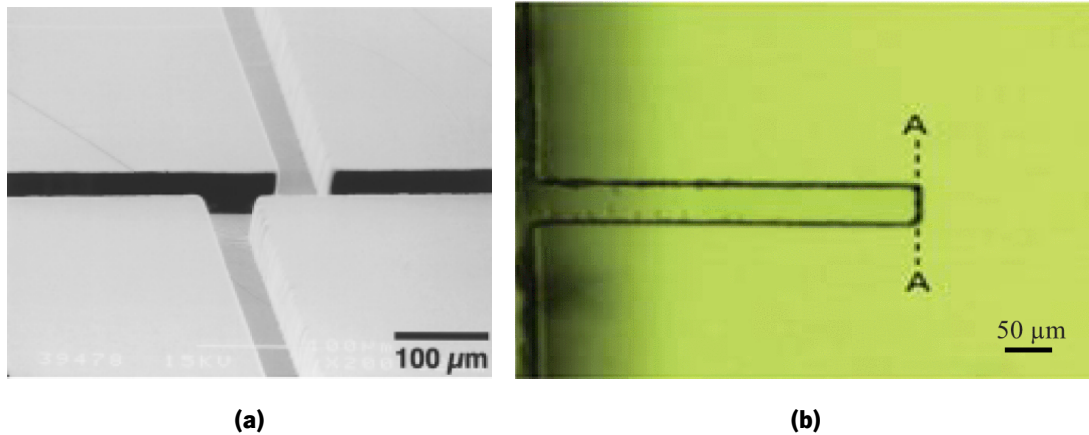


Figura 2.7: Exemplos de estruturas fabricadas em PDMS: (a) Canais microfluídicos (retirado de [56]); (b) Micro cantiléver usado como sensor de fluxo (retirado de [59]).

O PDMS é um material indicado para efetuar a fácil replicação de estruturas através de moldes negativos, devido à sua flexibilidade mecânica e baixa energia de superfície [51, 56, 57, 60]. Em 2016, Sun *et al.* [57] usaram o PDMS como material do molde negativo no fabrico de um conjunto de microlentes em resina curável por luz UV. Na figura 2.8 encontra-se esquematizado o processo de criação de microlentes em resina curável por luz UV, através de moldes negativos em PDMS. Começa-se pela criação do molde negativo ao verter o PDMS no molde mestre em polímero fotossensível, fabricado anteriormente (figura 2.8a). Segue-se uma cura do molde negativo e sua respetiva desmoldagem, sendo o molde negativo criado (figura 2.8b). Subsequentemente, é vertido no molde negativo resina, sendo esta curada através de uma lâmpada de luz UV (figura 2.8c). Como passo final, efetua-se a desmoldagem do molde negativo da resina, criando as réplicas de microlentes desejadas (figura 2.8d).

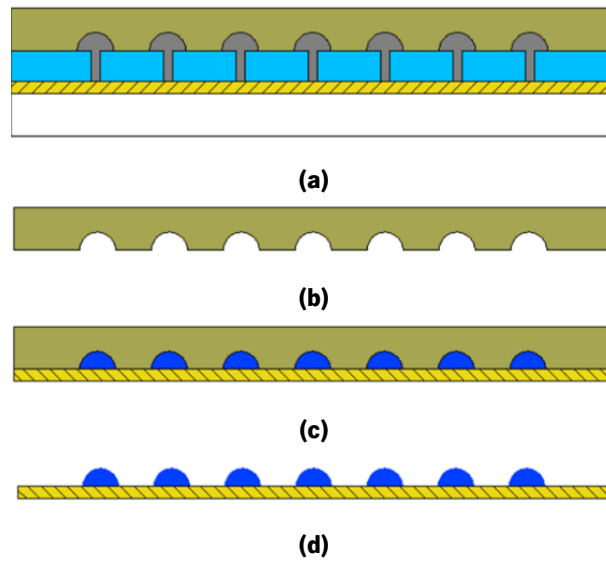


Figura 2.8: Esquemático do processo de criação de microlentes em resina curável por luz UV, através de moldes negativos em PDMS (adaptado de [57]): (a) Criação do molde negativo em PDMS através do molde mestre; (b) Cura e desmoldagem do molde negativo em PDMS; (c) Cura da resina vertida no molde negativo em PDMS através de luz UV; (d) Microlentes em resina criadas depois da desmoldagem do molde negativo em PDMS.

Como resultado final do processo desenvolvido por Sun *et al.* [57], pode-se observar na figura 2.9 o conjunto de microlentes fabricadas.

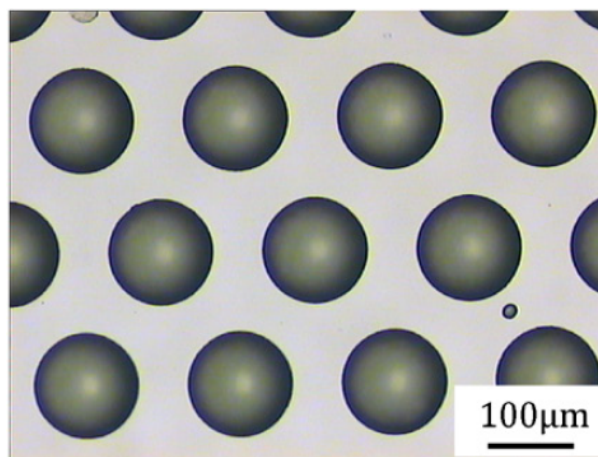


Figura 2.9: Conjunto de microlentes fabricadas por Sun *et al.* [57].

2.3 Fundamentos Teóricos

2.3.1 Refração em Superfícies Esféricas

A primeira consideração a ter em design ótico é a Lei da Refração, também conhecida por *Snell's Law*, proposta por Willebrord Snel van Royen em 1621 e mais tarde deduzida por René Descartes, representada pela seguinte equação:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (2.1)$$

em que n_i representa o índice de refração do meio de imersão, n_t representa o índice de refração do meio de transmissão, θ_i representa o ângulo da luz incidente com uma linha imaginária perpendicular à interface dos dois meios e θ_t representa o ângulo da luz com uma linha imaginária perpendicular à interface dos dois meios no meio de transmissão. Esta lei representa o desvio do percurso que a luz sofre, devido ao fenómeno de refração, quando esta encontra um meio com um índice de refração n diferente do meio que estava a percorrer anteriormente (figura 2.10) [34].

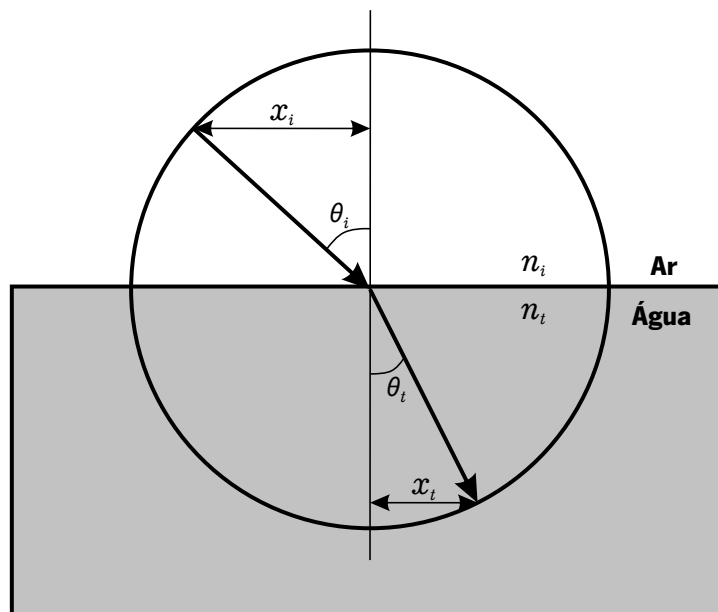


Figura 2.10: Esquemático de Descartes para deduzir a Lei da Refração (adaptado de [34]).

Quando um raio de luz encontra um meio ótico com um índice de refração maior, $n_i < n_t$, este sofre um desvio em direção à perpendicular. Quando o raio de luz encontra um meio ótico com um índice de refração menor, $n_i > n_t$, este afasta-se em relação à perpendicular [34].

A figura 2.11 representa uma onda com origem em S a incidir numa superfície esférica de raio R ,

centrada em C . O ponto V é designado por vértice da superfície, o comprimento $s_o = \overline{SV}$ é designado por distância do objeto e o comprimento $s_i = \overline{VP}$ é designado por distância da imagem. O raio \overline{SA} vai sofrer uma refração ao interagir com a superfície esférica, sendo redirecionado na direção do eixo óptico, com convergência em P , devido ao índice de refração n_2 ser superior ao índice de refração n_1 . Segundo o Princípio de Fermat, um raio de luz com origem num ponto S e destino num ponto P , deve percorrer uma distância de caminho ótico (OPL) que é estacionária com respeito às variações dessa mesma distância, isto é, a sua derivada em relação à variável de posição será zero [34]. Logo, o OPL do raio \overline{SA} será representado pela seguinte equação:

$$OPL = n_1 l_o + n_2 l_i \quad (2.2)$$

Usando a lei do cosseno nos triângulos SAC e ACP , em conjunto com $\cos \varphi = -\cos(180^\circ - \varphi)$, obtém-se

$$l_o = [R^2 + (s_o + R)^2 - 2R(s_o + R) \cos \varphi]^{1/2}$$

e

$$l_i = [R^2 + (s_i - R)^2 + 2R(s_i - R) \cos \varphi]^{1/2}$$

O OPL pode ser reescrito como

$$OPL = n_1 [R^2 + (s_o + R)^2 - 2R(s_o + R) \cos \varphi]^{1/2} + n_2 [R^2 + (s_i - R)^2 + 2R(s_i - R) \cos \varphi]^{1/2}$$

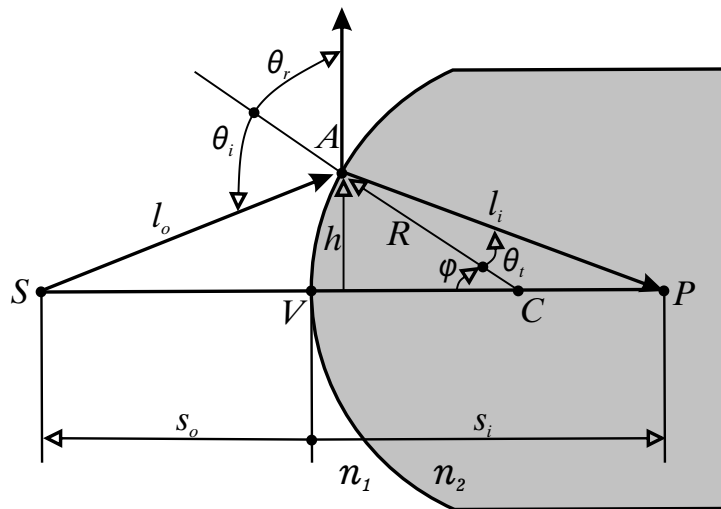


Figura 2.11: Esquemático da refração de uma onda, com origem em S e convergência em P , numa superfície esférica (adaptado de [34]).

Todas as variáveis na figura 2.11 são positivas, o que serve como base para a convenção sinalética a usar, descrita na tabela 2.1. À medida em que o ponto A se desloca, mantendo um raio fixo ($R =$ constante), φ é a variável de posição, levando a que $d(OPL)/d\varphi = 0$, e aplicando o Princípio de Fermat obtém-se,

$$\frac{n_1 R(s_o + R) \sin \varphi}{2l_o} - \frac{n_2 R(s_i - R) \sin \varphi}{2l_i} = 0 \quad (2.3)$$

simplificando

$$\frac{n_1}{l_o} + \frac{n_2}{l_i} = \frac{1}{R} \left(\frac{n_2 s_i}{l_i} - \frac{n_1 s_o}{l_o} \right) \quad (2.4)$$

Apesar de a equação 2.4 estar correta, ela é demasiado complicada. Se A for movido para uma nova localização através da mudança de φ , o novo raio de luz não irá intercepar o eixo ótico em P .

Sabendo que

$$\cos \varphi = 1 - \frac{\varphi^2}{2!} + \frac{\varphi^4}{4!} - \frac{\varphi^6}{6!} + \dots \quad (2.5)$$

e

$$\sin \varphi = \varphi - \frac{\varphi^3}{3!} + \frac{\varphi^5}{5!} - \frac{\varphi^7}{7!} + \dots \quad (2.6)$$

Assumindo valores pequenos de φ (A perto de V), $\cos \varphi \approx 1$. Consequentemente, as expressões para l_o e l_i resultam em $l_o \approx s_o$, $l_i \approx s_i$, dando origem à seguinte aproximação:

$$\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad (2.7)$$

A equação 2.7 poderia ter sido derivada também a partir da *Snell's Law* em vez do Princípio de Fermat, neste caso, valores pequenos de φ levaria a $\sin \varphi \approx \varphi$ e chegaria-se outra vez à equação 2.7. Esta aproximação estipula o domínio do que é chamado de teoria de primeira-ordem. Os raios de luz que chegam com ângulos rasos em relação ao eixo ótico, sendo φ e h apropriadamente pequenos, são denominados de raios paraxiais. A pequena área onde se encontram os raios paraxiais é denominada de região paraxial. Em 1841, Gauss, foi o primeiro a demonstrar a formação de imagens segundo a aproximação aqui descrita, sendo esta conhecida por diferentes nomes: primeira-ordem, paraxial, ou Ótica Gaussiana [34].

Tabela 2.1: Convenção sinalética para superfícies refratoras esféricas e lentes finas com incidência de luz da esquerda para a direita (adaptado de [34]).

Símbolo	Sinal
s_o, f_o	Positivo quando se encontra à esquerda de V
s_i, f_i	Positivo quando se encontra à direita de V
R	Positivo quando C se encontra à direita de V

2.3.2 Lentes Esféricas

As lentes esféricas são caracterizadas pela curvatura dos seus dois lados e podem ser designadas por: (i) positivas, convexas ou convergentes quando são mais espessas no centro da lente, fazendo com que as ondas incidentes converjam, à medida que percorrem a lente (figura 2.12a); (ii) negativas, côncavas ou divergentes quando são mais finas no centro da lente, fazendo com que as ondas incidentes diverjam à medida que percorrem a lente (figura 2.12b) [34]. Ao variar as curvaturas dos dois lados das lentes, pode-se variar os seus raios, R_1 e R_2 , obtendo-se assim diferentes variações apresentadas na tabela 2.2.

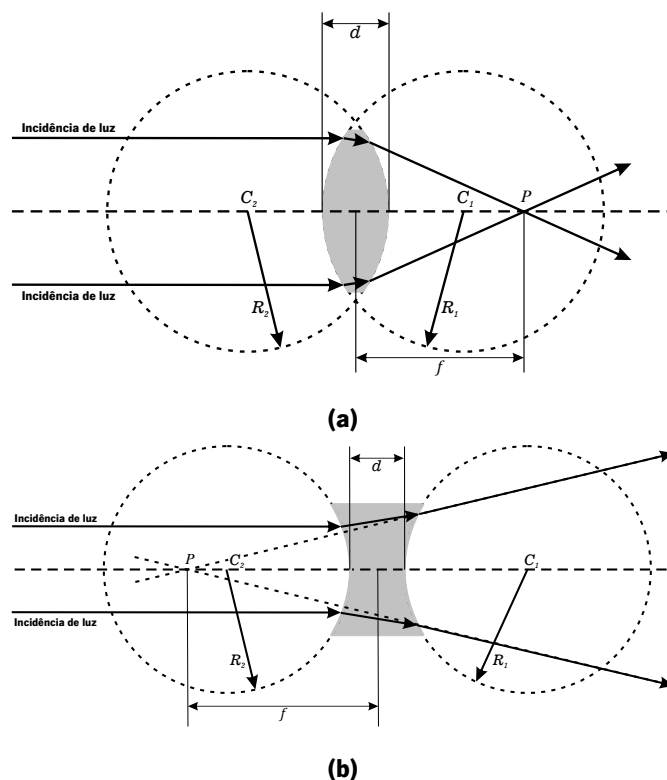










Figura 2.12: Representação de tipos de lentes: (a) Lentes positivas, convexas ou convergentes; (b) Lentes negativas, côncavas ou divergentes (adaptado de [34]).

Tabela 2.2: Definição e corte transversal de lentes com variações dos seus raios [34].

Lentes Convexas	Lentes Côncavas
<p>Equiconvexa $R_1 = -R_2$</p> 	<p>Equicôncava $-R_1 = R_2$</p> 
<p>Biconvexa $R_1 > 0$ e $R_2 < 0$</p> 	<p>Bicôncava $R_1 < 0$ e $R_2 > 0$</p> 
<p>Plano-convexa $R_1 = \infty$ e $R_2 < 0$</p> 	<p>Plano-côncava $R_1 = \infty$ e $R_2 > 0$</p> 
<p>Menisco-convexa $R_1 > 0$ e $R_2 > 0$</p> 	<p>Menisco-côncava $R_1 < 0$ e $R_2 < 0$</p> 

2.3.3 Equações de Lentes Finas

Quando temos uma lente suficientemente fina, $d \rightarrow 0$, com um índice de refração n_l e encontra-se rodeada por ar, $n_{ar} \approx 1$, temos a Equação de Lentes Finas:

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = (n_l - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.8)$$

Quando só existe uma superfície esférica, lentes plano-convexas ou lentes plano-côncavas, a distância da imagem s_i passa a ser designada por distância focal f_i , similarmente, a distância do objeto s_o passa a distância focal f_o [34]. Levando assim que $f_i = f_o$, podendo-se simplificar a equação 2.8:

$$\frac{1}{f} = (n_l - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.9)$$

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} \quad (2.10)$$

Sendo a equação 2.10 conhecida por Equação de Gauss [34].

Uma observação prática a fazer é a relação entre a distância focal e o raio de curvatura da lente. Considerando a equação 2.9 e uma lente equiconvexa para qual $R_1 = -R_2 = R$, esta equação passa a $f = R/2(n_l - 1)$. Concluindo-se que quanto menor o raio de curvatura da lente, menor é a sua distância focal, representado na figura 2.13 [34].

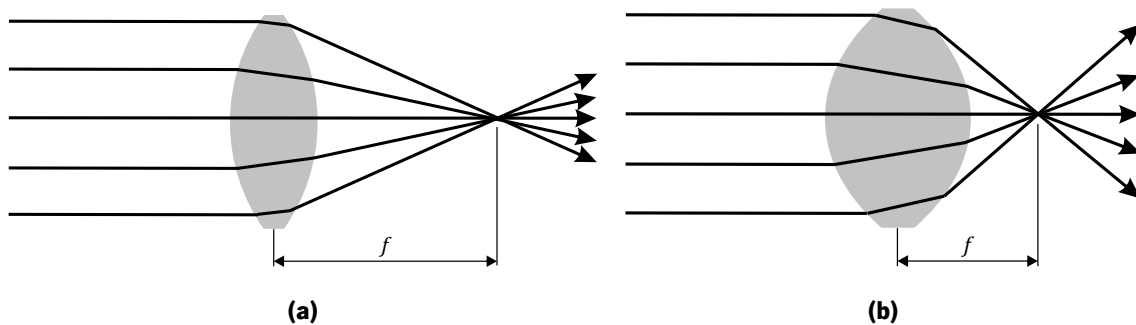


Figura 2.13: Relação entre distância focal e raio de curvatura de uma lente: (a) Raio de curvatura maior com distância focal maior; (b) Raio de curvatura menor com distância focal menor (adaptado de [34]).

Uma das características mais importantes das lentes é a sua abertura numérica (NA), que indica o conjunto de ângulos que a mesma aceita ou emite luz [61], dada pela seguinte equação:

$$NA = n_i \sin \theta_{max} \quad (2.11)$$

onde n_i é o índice de refração do meio de imersão circundante e θ_{max} é metade do ângulo máximo do cone de luz aceite pela lente [34].

O número focal ($f/\#$), também conhecido por velocidade da lente, é uma outra característica apresentada muitas vezes em conjunto com \mathcal{NA} , dado pela seguinte equação:

$$f/\# = \frac{f}{D} \quad (2.12)$$

onde f é a distância focal e D é o diâmetro de abertura da lente. Como exemplo, uma lente com um f de 100 μm e um D de 50 μm tem um $f/\#$ de 2, representado por $f/2$ [34].

2.3.4 Aberrações Monocromáticas e Aberração Cromática

Sabendo que a teoria de primeira-ordem é uma boa aproximação, uma simulação ou um estudo real do traçado dos raios de luz numa lente, revela certas inconsistências com a sua descrição paraxial. Estas inconsistências em relação à Ótica Gaussiana são conhecidas por aberrações. Existem dois tipos de aberrações: (i) aberrações monocromáticas, onde se encontram a aberração esférica, aberração coma, estigmatismo, curvatura de campo e distorção, e (ii) aberrações cromáticas, devido ao facto de o índice de refração ser em função do comprimento de onda da luz [34].

Devido à aproximação paraxial, foi assumido até agora que $\sin \varphi$ poderia ser só φ , isto é, o sistema foi restringido a operar numa região extremamente estreita em relação ao eixo ótico. Sendo os raios de luz que atingem a periferia de uma lente incluídos na formação de uma imagem, a aproximação $\sin \varphi \approx \varphi$ não é satisfatória. Se considerarmos os dois primeiros termos da equação 2.6 para uma aproximação mais correta, será obtida a teoria de terceira-ordem. Ao ser utilizada a teoria de terceira-ordem em vez da teoria de primeira-ordem, irão ser obtidas as cinco aberrações primárias. Estas aberrações primárias são a aberração esférica, aberração coma, aberração curvatura de campo, estigmatismo e distorção [34].

2.3.4.1 Aberração Esférica

A aberração esférica (SA), causa diferentes pontos focais ao longo do eixo ótico, devido aos raios que atingem a superfície da lente a distâncias muito superiores acima do seu eixo (h), denominados por raios não-paraxiais ou raios marginais, sendo estes focados a distâncias inferiores, demonstrado na figura 2.14. Neste caso, a aberração é positiva. No caso de uma lente côncava, os raios marginais iriam interseção o eixo ótico para lá do foco paraxial, fazendo com que a aberração esférica seja negativa [34].

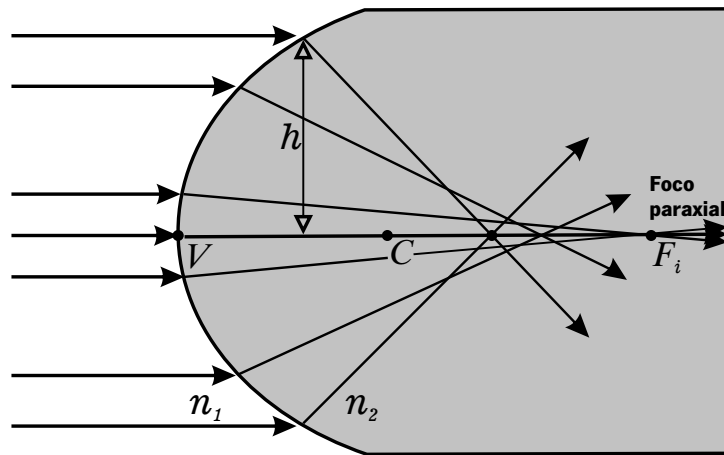


Figura 2.14: Aberração esférica resultante de uma superfície esférica (adaptado de [34]).

Este fenómeno pode ser visto na figura 2.15, obtida através de uma simulação do traçado dos raios de luz no *software COMSOL Multiphysics*, numa lente plano-convexa. A distância entre a interseção axial de um raio marginal que entra paralelo ao eixo ótico e ao foco paraxial, F_i , é conhecida por aberração esférica longitudinal (LSA). A altura acima do eixo ótico onde um raio marginal atinge o plano de F_i é conhecida por aberração esférica transversal (TSA). A envoltória dos raios refratados, com a forma aproximada de um funil, é chamada de cáustica. Os raios marginais ao intersetarem a cáustica formam uma área denominada por círculo de menor confusão Σ_{LC} [34].

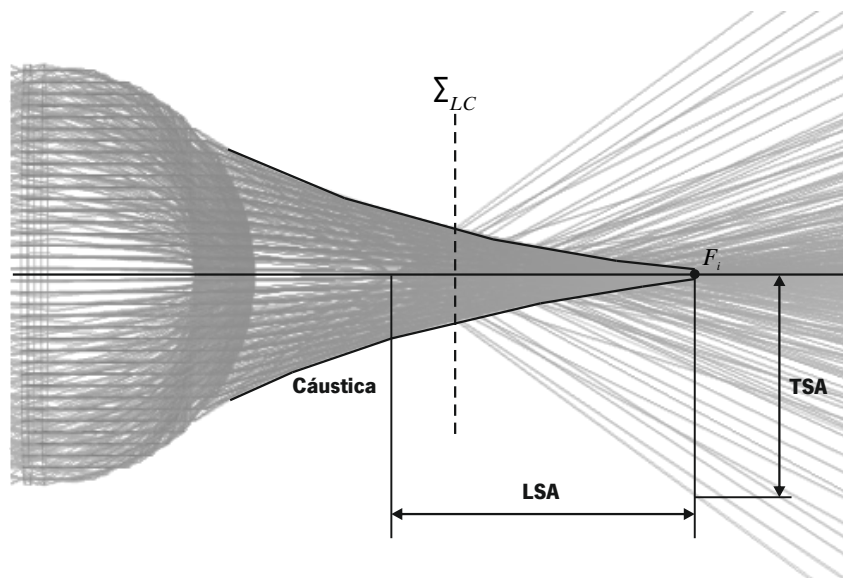


Figura 2.15: Aberração esférica causada por uma lente plano-convexa.

2.3.4.2 Aberração Coma

A aberração coma surge quando um objeto se encontra fora do eixo óptico da lente. Na figura 2.16 pode-se ver vários raios fora do eixo óptico com origem no ponto S , formando uma imagem comática no plano de imagem Σ_i . Na figura 2.16a, os raios marginais chegam a Σ_i mais perto do eixo óptico do que os raios na vizinhança do raio principal. Devido a esta distribuição a aberração coma é negativa. Na figura 2.16b, a aberração coma é positiva, pois os raios marginais focam mais longe do eixo óptico do que os raios na vizinhança do raio principal [34].

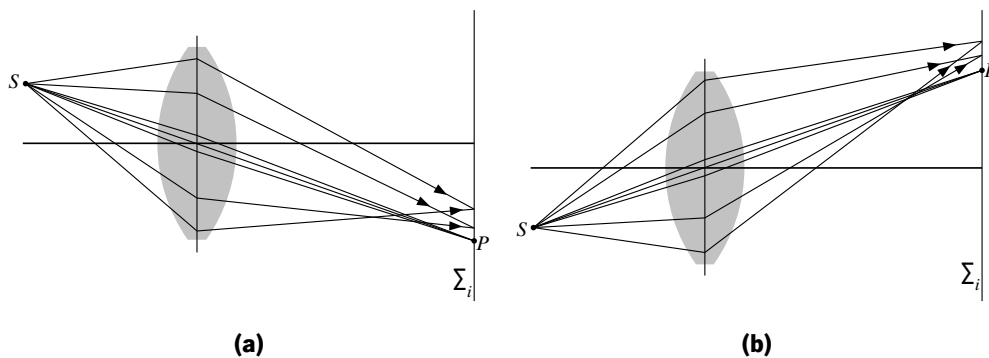


Figura 2.16: Representação da aberração coma negativa e positiva: (a) Aberração coma negativa; (b) Aberração coma positiva (adaptado de [34]).

Ao envolvermos os raios de luz na forma de um cone (figura 2.17a), depois de passarem na lente, os seus pontos (1-2-3-4-1-2-3-4) irão formar círculos com a forma da cauda de um cometa. Este caso corresponde à aberração coma positiva, pois os raios marginais focam mais longe do eixo óptico do que os raios na vizinhança do raio principal. Na figura 2.17b, estão representados os pontos do cone dos raios de luz na lente e seus pontos correspondentes em Σ_i [34].

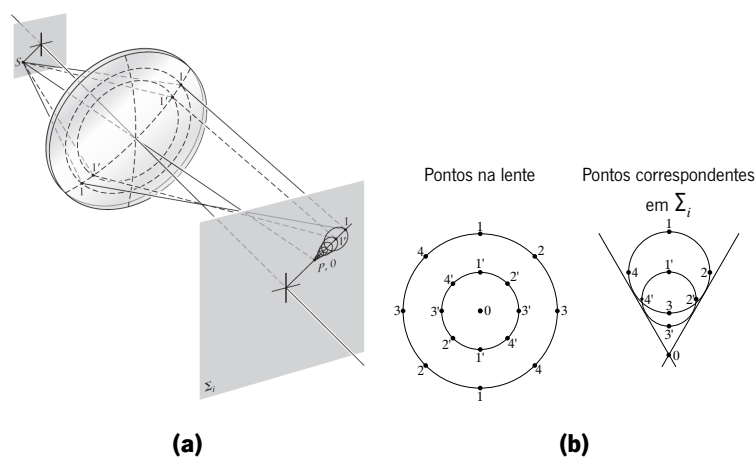


Figura 2.17: Representação da aberração coma: (a) Formação geométrica da imagem comática; (b) Pontos do cone dos raios de luz na lente e pontos correspondentes em Σ_i (adaptado de [34]).

2.3.4.3 Estigmatismo

Quando um objeto se encontra a uma distância considerável do eixo óptico, o cone de raios de luz incidente irá atingir a lente de uma forma assimétrica, criando assim estigmatismo. Na figura 2.18 está representado um esquema para uma fácil compreensão desta aberração. No plano tangencial pode ser encontrado o raio principal, raios tangenciais e o eixo óptico da lente. O plano sagital, perpendicular ao plano tangencial, contém o raio principal e os raios sagitais. Ao contrário do plano tangencial, o plano sagital muda de inclinação à medida que o raio principal é inclinado. Devido a esta distribuição dos raios, a distância focal nos dois planos é diferente, sendo os meridionais os raios com uma distância focal menor, devido à sua inclinação [34].

Devido à existência de duas distâncias focais, o cone de raios de luz incidente irá obter uma forma alterada após ser refratado. A forma do corte transversal do cone imediatamente após a passagem pela lente é circular, mas à medida que avança pelo plano sagital toma uma forma elíptica até ao foco tangencial, F_T , onde degenera numa “linha”. Todos os raios do objeto atravessam esta “linha”, denominada de imagem primária. Após a imagem primária, os raios abrem até tomarem, novamente, uma forma circular em Σ_{LC} . Afastando-se ainda mais da lente, o cone dos raios de luz volta a degenerar numa “linha”, designada de imagem secundária, no foco sagital, F_S [34].

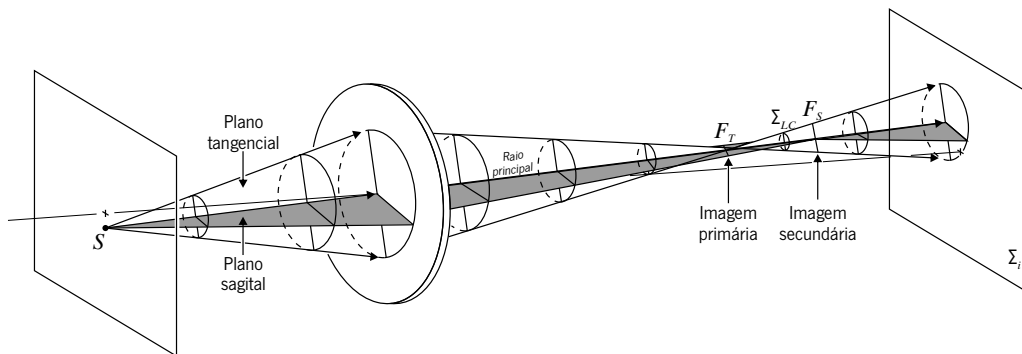


Figura 2.18: Representação esquemática de estigmatismo (adaptado de [34]).

2.3.4.4 Curvatura de Campo

Um objeto planar normal ao eixo óptico forma, aproximadamente, uma imagem plana exclusivamente na região paraxial. A superfície curva formada pela imagem não estigmática é a manifestação da aberração curvatura de campo. Na figura 2.19, o segmento do objeto esférico σ_o forma o segmento esférico σ_i , ambos centrados em O . Se se achatar o plano σ_o no plano σ'_o , cada ponto da imagem move-se na direção da lente ao longo do raio principal, formando uma superfície paraboloide denominada de superfi-

cie Petzval, Σ_P . Numa lente convexa, Σ_P curva para o interior na direção do plano do objeto. Para uma lente côncava, Σ_P curva para fora na direção oposta do plano do objeto. A distância Δx , a uma altura y_i , é dada por,

$$\Delta x = \frac{y_i^2}{2} \sum_{j=1}^m \frac{1}{n_j f_j} \quad (2.13)$$

onde n_j e f_j são os índices de refração e distâncias focais de m lentes finas que formam o sistema óptico [34].

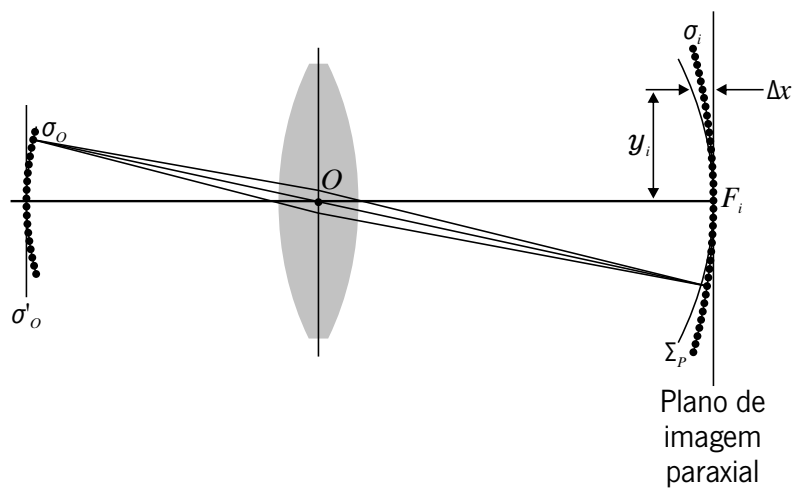


Figura 2.19: Representação esquemática da aberração curvatura de campo (adaptado de [34]).

Na figura 2.20a, pode-se observar a imagem formada numa superfície plana perto do plano de imagem paraxial, focada apenas no centro. Na figura 2.20b, a superfície foi movida para mais perto da lente, o que leva a focar os seus limites [34].

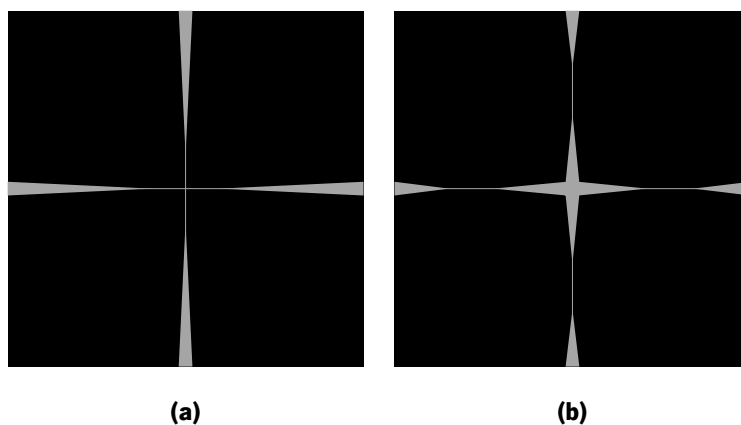


Figura 2.20: Efeito de curvatura de campo numa superfície plana: (a) Superfície plana perto do plano de imagem paraxial; (b) Superfície plana mais perto da lente (adaptado de [34]).

A curvatura de campo e estigmatismo são aberrações intimamente relacionadas. Quando o estigmatismo está presente, irão-se formar duas superfícies paraboloides, a tangencial, Σ_T , e sagital, Σ_S , representadas na figura 2.21. Σ_T e Σ_S são as parábolas de todas as imagens primárias e secundárias, respetivamente, à medida que o objeto se desloca no próprio plano. Não havendo estigmatismo, Σ_T e Σ_S juntam-se em Σ_P [34].

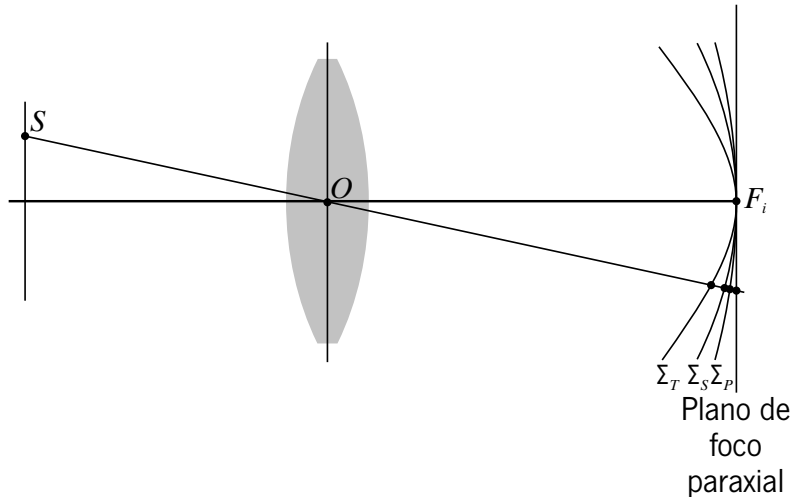


Figura 2.21: Representação das superfícies de imagem tangencial, sagital e Petzval (adaptado de [34]).

2.3.4.5 Distorção

A distorção surge porque diferentes áreas da lente possuem diferentes distâncias focais e diferentes magnificações. Na ausência de qualquer uma das outras aberrações, a distorção é manifestada pela deformação da imagem num todo, mesmo assim, com cada ponto focado corretamente. Se se visualizar uma matriz quadrangular num sistema ótico onde está presente deformação positiva, o resultado pode ser observado na figura 2.22b. Neste caso, cada ponto da imagem é deslocado radialmente para fora desde o centro. No caso de um sistema ótico com distorção negativa, cada ponto da imagem é deslocado radialmente na direção do centro, como pode ser visto na figura 2.22c [34].

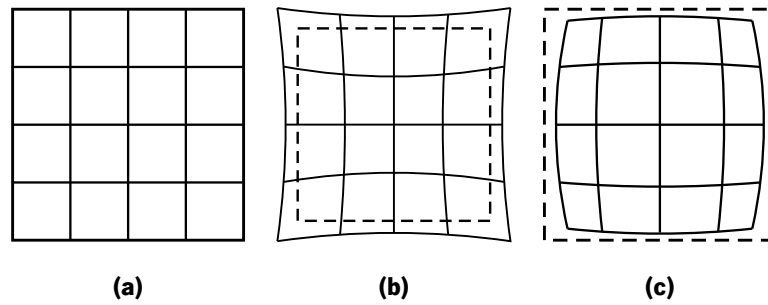


Figura 2.22: Efeito de distorção numa matriz quadrangular: (a) Matriz quadrangular sem distorção; (b) Matriz quadrangular sob efeito de distorção positiva; (c) Matriz quadrangular sob efeito de distorção negativa (adaptado de [34]).

2.3.4.6 Aberração Cromática

A aberração cromática surge quando é usada luz policromática. Como a equação 2.9 está em função do índice de refração, que por sua vez varia com o comprimento de onda, a distância focal vai variar com os diferentes comprimentos de onda. Em geral, o índice de refração diminui com o comprimento de onda ao longo do espectro da luz visível, o que faz com que a distância focal aumente com o comprimento de onda. Na figura 2.23a pode-se verificar que numa luz branca colimada, as cores que a compõem, focam em diferentes pontos ao longo do eixo óptico. A distância axial entre dois pontos focais que abrangem uma gama de frequências é designada por aberração cromática axial (ACA). A imagem de um objeto descentrado irá ser formada a diferentes distâncias focais e a diferentes distâncias verticais do eixo óptico. Essa distância vertical designa-se por aberração cromática lateral (LCA), que pode ser vista na figura 2.23b [34].

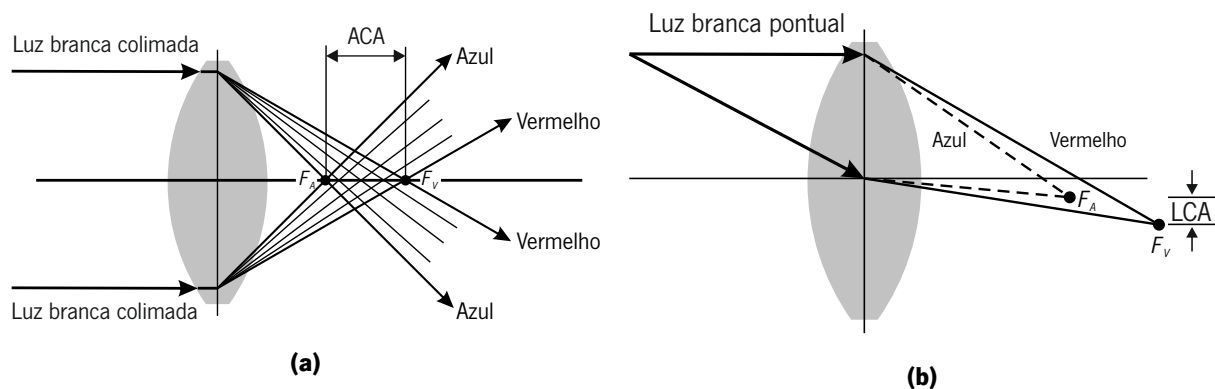


Figura 2.23: Representação de aberração cromática: (a) Aberração cromática axial; (b) Aberração cromática lateral (adaptado de [34]).

Capítulo 3

Simulações FEM de Microlentes

O presente capítulo apresenta as simulações FEM de dois modelos de microlentes simétricas e um modelo de microlente assimétrica.

3.1 Pré-requisitos das Simulações

Antes e durante a otimização do primeiro processo de fabrico das microlentes, foram realizadas diferentes simulações através do método de elementos finitos (FEM) no *software COMSOL Multiphysics*. Estas simulações, que irão ser apresentadas de seguida, serviram para determinar a altura necessária de uma microlente em PDMS, com uma base de 75 μm de diâmetro, capaz de colimar a luz azul emitida por um microLED, *ELC-470-34* da *Roithner LaserTechnik*, com as dimensões 310 μm x 85 μm x 280 μm [62]. Optou-se pelo microLED *ELC-470-34* pois este emite luz monocromática azul, necessária para a realização da fotoestimulação da opsina ChR2, possui um ângulo de emissão relativamente pequeno, o que facilita a colimação da luz, e possui reduzidas dimensões, requisito essencial para ser integrado numa sonda neuronal. A escolha do diâmetro da base da microlente na simulação deveu-se à correspondência do menor diâmetro de padrões circulares possível para se obter uma impressão em fotolito com boa qualidade, usado no processo de fotolitografia. Com este valor de diâmetro selecionado, a utilização de uma matriz de microlentes com dimensões reduzidas no topo do microLED, em vez de uma única microlente com uma altura e um diâmetro muito mais elevado, é capaz de colimar a luz emitida pelo microLED. As simulações serviram também para a determinação da trajetória da luz, potência da luz, irradiância da luz e distância focal das microlentes.

Antes da simulação ser efetuada, foi necessário determinar o equivalente do microLED selecionado a

usar na simulação. As características necessárias do microLED para a sua simulação são o comprimento de onda de luz (λ) emitida, ângulo de emissão, número de raios de luz e potência ótica, também designado por fluxo radiante.

Como o documento técnico do microLED só fornece a intensidade luminosa (I_v) em candelas (cd) [62], teve de se proceder à conversão de I_v para fluxo luminoso (ϕ_v) em lúmen (lm) através da seguinte equação:

$$\phi_v = I_v \Omega \quad (3.1)$$

onde Ω representa o ângulo sólido em esterradianos (sr) e é obtido através da seguinte equação:

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos \theta) \quad (3.2)$$

onde θ representa metade do ângulo de emissão do microLED [63]. Ao introduzir o valor de θ , 17° , na equação 3.2 e de seguida I_v , 280 mcd [62], na equação 3.1, obtém-se um ϕ_v de 76,873 mlm.

Com o ϕ_v determinado, foi necessário proceder à determinação do fluxo radiante (ϕ_e) em watt (W) do microLED através da seguinte equação:

$$\phi_e = \frac{\phi_v}{683V(\lambda)} \quad (3.3)$$

onde $V(\lambda)$ representa a curva espectral da eficiência luminosa fotópica, que indica a resposta espectral do olho humano a vários comprimentos de onda, e a constante 683 corresponde a 683 lm/W de eficácia luminosa fotópica máxima, para uma luz monocromática com um λ de 555 nm [63]. Consultando então os valores de $V(\lambda)$, um λ de 470 nm corresponde a 0,090980 [64]. Ao introduzir os valores obtidos do ϕ_v e $V(\lambda)$ na equação 3.3, obtém-se um ϕ_e de 1,2371 mW.

Para a simulação da distribuição de luz do microLED, com um ângulo de emissão de 34° , foi escolhida uma distribuição cónica de 10.000 raios de luz, capaz de atingir toda a base da microlente. Os parâmetros necessários para uma distribuição cónica são o ângulo do cone e a sua origem. O parâmetro do ângulo do cone, 34° , foi convertido para radianos, $17\pi/90$, para poder ser introduzido corretamente na simulação. Para a determinação da origem recorreu-se à equação trigonométrica da tangente:

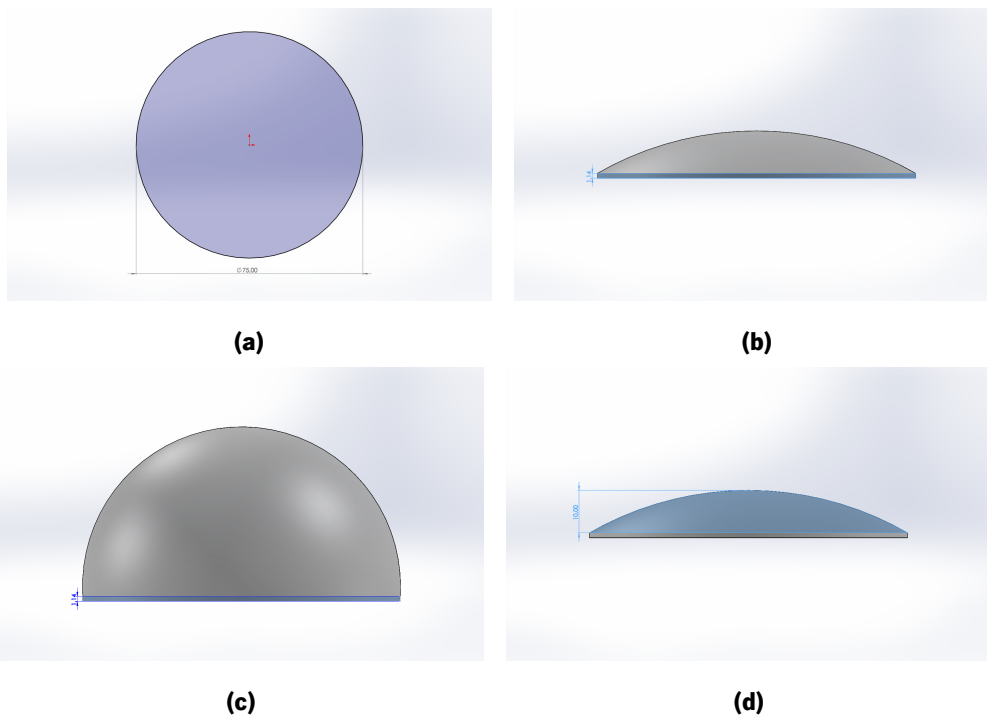
$$\tan \alpha = \frac{CO}{CA} \quad (3.4)$$

onde α representa o ângulo do cone, CO o raio da microlente e CA a distância a que se encontra a

origem. Introduzindo os valores de CO , $37,5\ \mu\text{m}$, e de α , 34° , na equação 3.4, obtém-se um CA de $55,596\ \mu\text{m}$.

3.2 Microlentes Simétricas

Para a simulação das microlentes simétricas, foram desenhadas no *software SOLIDWORKS* dois modelos de microlentes. Ambos os modelos possuem uma base com um diâmetro de $75\ \mu\text{m}$ (figura 3.1a) e $1,14\ \mu\text{m}$ de espessura (figura 3.1b e figura 3.1c). O primeiro modelo contém uma altura de $10\ \mu\text{m}$ (figura 3.1d), enquanto que o segundo modelo contém altura de $40\ \mu\text{m}$ (figura 3.1e). As dimensões apresentadas na figura 3.1b e na figura 3.1d representam as espessuras esperadas dos polímeros fotossensíveis selecionados segundo os seus *datasheets* [65, 66], para as configurações do primeiro processo fotolitográfico desenvolvido. As dimensões apresentadas na figura 3.1c e na figura 3.1e representam as espessuras esperadas dos polímeros fotossensíveis selecionados segundo os seus *datasheets* [65, 67], para as configurações do segundo processo fotolitográfico, antes de ser selecionado um novo polímero fotossensível como base.



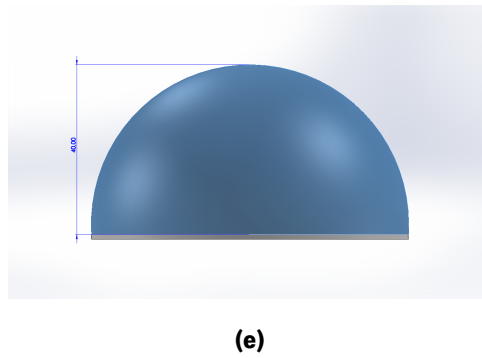


Figura 3.1: Dimensões de dois modelos de microlentes simétricas desenhadas em *SOLIDWORKS*: (a) Base com 75 μm de diâmetro; (b) Base com 1,14 μm de espessura do primeiro modelo; (c) Base com 1,14 μm de espessura do segundo modelo; (d) Microlente com altura de 10 μm ; (e) Microlente com altura de 40 μm .

3.2.1 Microlentes Simétricas em PDMS com Altura de 10 μm e Diâmetro de 75 μm

Após o desenho do primeiro modelo de microlente, o seu design foi importado para o *COMSOL Multiphysics* e realizado um estudo do traçado dos raios de luz, numa interface de ótica geométrica. Foi adicionada uma malha extremamente fina ao modelo, com parâmetros de tamanho máximo de elementos de 5 μm , tamanho mínimo de elementos de 0,02 μm , taxa máxima de crescimento de elementos de 2 e fator de curvatura de 0,1 (figura 3.2). Como material para a microlente, foi escolhido o PDMS, com um $n = 1,4399$ para um λ de 470 nm, e um $n = 1$ para todos os domínios exteriores, representados por ar.

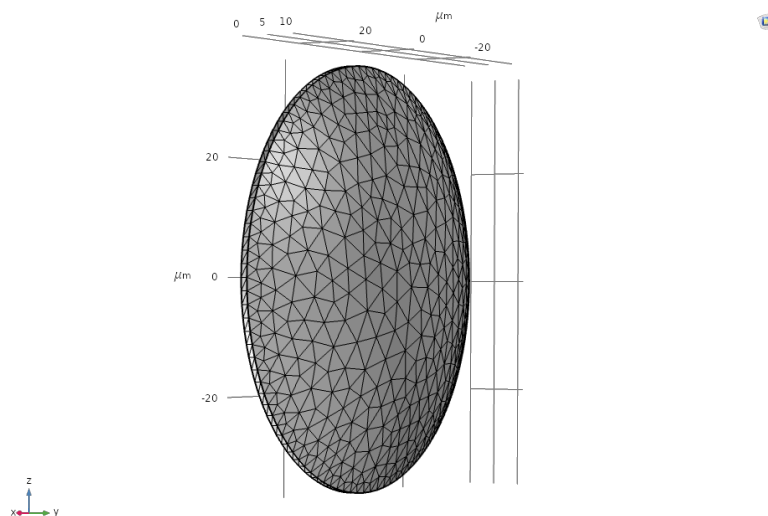


Figura 3.2: Malha aplicada ao modelo de microlente com altura de 10 μm e diâmetro de 75 μm .

A fonte de luz azul não polarizada foi configurada para uma distribuição cônica com densidade uniforme, 10.000 raios de luz, $\alpha = 17\pi/9$, $\phi_e = 1,2371$ mW e origem em $-55,596$ μm .

Como resultado da simulação obteve-se um traçado dos raios de luz representado na figura 3.3a e figura 3.3b. Através da análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que uma microlente em PDMS com altura de 10 μm e diâmetro de 75 μm , apesar de provocar um desvio na trajetória da luz, esta não é capaz de cumprir o requisito de colimar a luz.

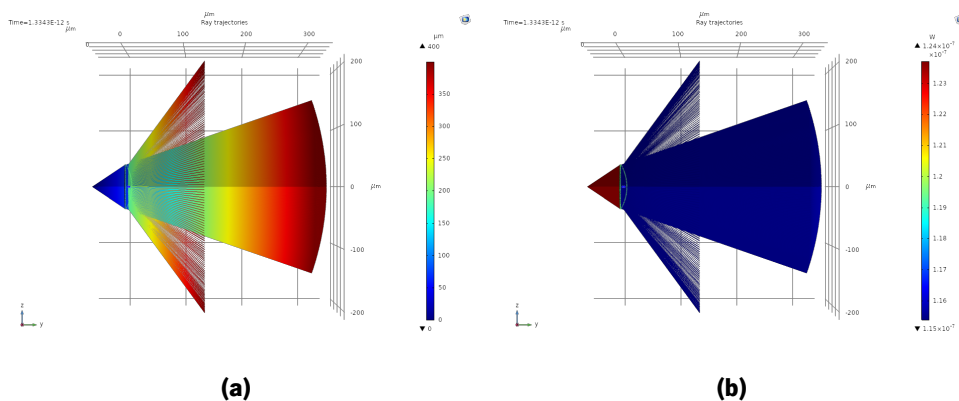


Figura 3.3: Resultado da simulação de traçado dos raios de luz de uma microlente em PDMS com altura de 10 μm e diâmetro de 75 μm : (a) Traçado dos raios de luz com uma expressão de cor de distância percorrida; (b) Traçado dos raios de luz com uma expressão de cor de potência ótica.

Foi realizada também uma simulação para a determinação da distância focal da microlente em PDMS com altura de 10 μm e diâmetro de 75 μm . Como fonte de luz, foi selecionada a base da microlente como superfície iluminadora, pois esta cria uma fonte de luz colimada. Sendo criada uma luz colimada, esta é refratada pela microlente e focada a uma certa distância, sendo criado o círculo de menor confusão na distância focal da microlente. Após a simulação, foi obtida uma distância focal de 143 μm , representada na figura 3.4a e figura 3.4b.

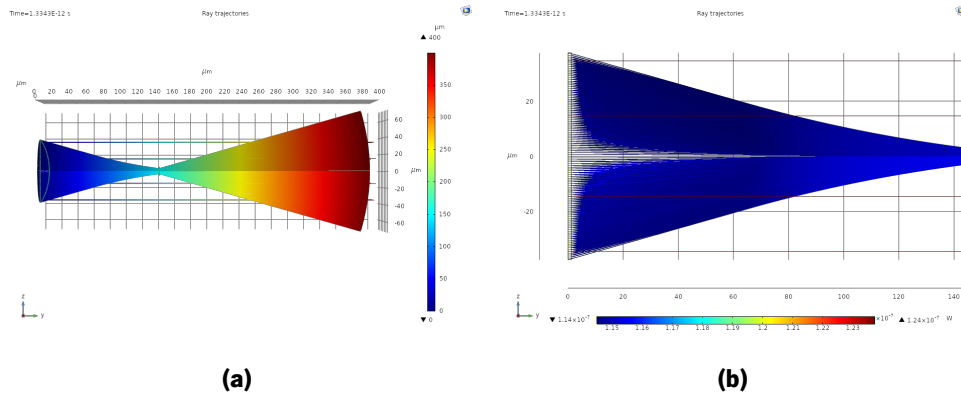


Figura 3.4: Resultado da simulação para a determinação da distância focal de uma microlente em PDMS com altura de 10 μm e diâmetro de 75 μm: (a) Traçado dos raios de luz com uma expressão de cor de distância percorrida; (b) Traçado dos raios de luz com uma expressão de cor de potência ótica até à distância focal obtida de 143 μm.

Após a distância focal ter sido obtida, foi colocado um detetor circular a esta distância para a obtenção dos valores de irradiância (E_e) na sua superfície. Foi aplicado ao detetor uma malha extremamente fina, com tamanho máximo de elementos de 1,35 μm (figura 3.5a). Os resultados obtidos no detetor mostram um círculo de menor confusão com diâmetro aproximado de 8 μm, uma irradiância máxima no seu centro de $1,11 \times 10^8 \text{ W/m}^2$ e mínima nos seus limites exteriores de aproximadamente $0,2 \times 10^8 \text{ W/m}^2$ (figura 3.5b).

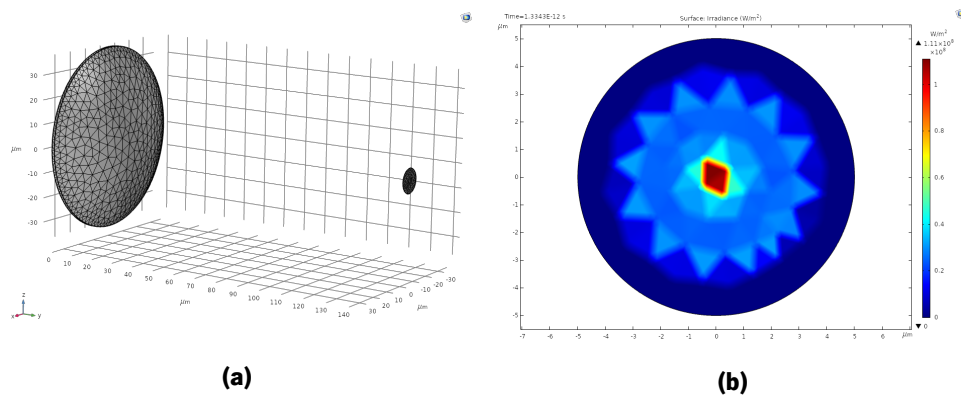


Figura 3.5: Resultado da simulação de irradiância num detetor posicionado à distância focal de uma microlente em PDMS com altura de 10 μm e diâmetro de 75 μm: (a) Malha e posição do detetor mais a microlente; (b) Distribuição de valores de irradiância obtidos no detetor.

3.2.2 Microlentes Simétricas em PDMS com Altura de 40 μm e Diâmetro de 75 μm

Com a conclusão obtida na secção 3.2.1, de que uma microlente em PDMS com altura de 10 μm e diâmetro de 75 μm não é capaz de colimar a luz, foi realizada uma nova simulação em *COMSOL Multiphysics*, com um novo modelo de microlente. Após o novo modelo ser importado, foi adicionado um detetor circular a 100 μm e uma parede a $-57 \mu\text{m}$ da base da microlente. Os parâmetros de simulação descritos na secção 3.2.1 foram mantidos, sendo adicionada uma malha normal à parede traseira (figura 3.6). O detetor foi colocado a 100 μm da origem para se poder observar um traçado dos raios de luz mais completo, pois existem raios de luz que não foram colimados. A necessidade da parede traseira deve-se apenas a uma questão de melhor observação do traçado dos raios de luz, pois como a microlente possui uma altura elevada, um certo número de raios de luz são refletidos para trás, sendo estes feitos desaparecer quando atingem a parede.

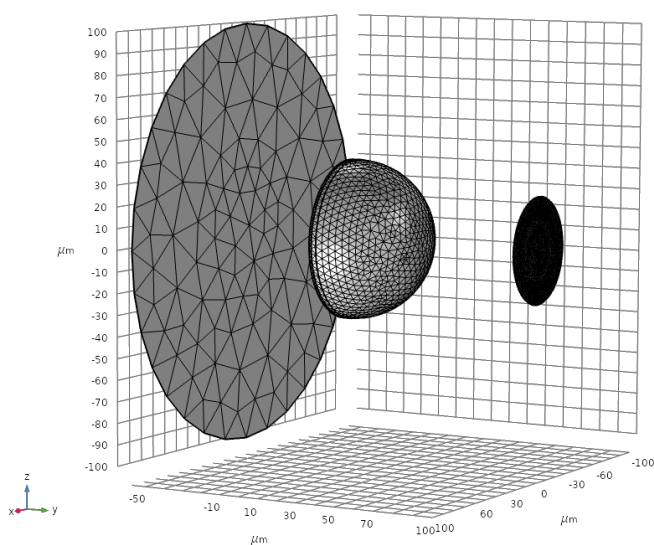


Figura 3.6: Malhas aplicadas ao modelo de microlente com altura de 40 μm e diâmetro de 75 μm , detetor e parede traseira.

Após a simulação ser concluída, pode-se observar na figura 3.7a e figura 3.7b, um traçado de raios de luz colimado, garantindo assim o requisito necessário. Na figura 3.7c e figura 3.7d, está representado o mesmo traçado de raios de luz, mas apenas com 5% de raios apresentados, para se poder observar um certo número de raios que partem do vértice da microlente sem serem colimados, devido à espessura elevada da microlente e reflexão no seu interior.

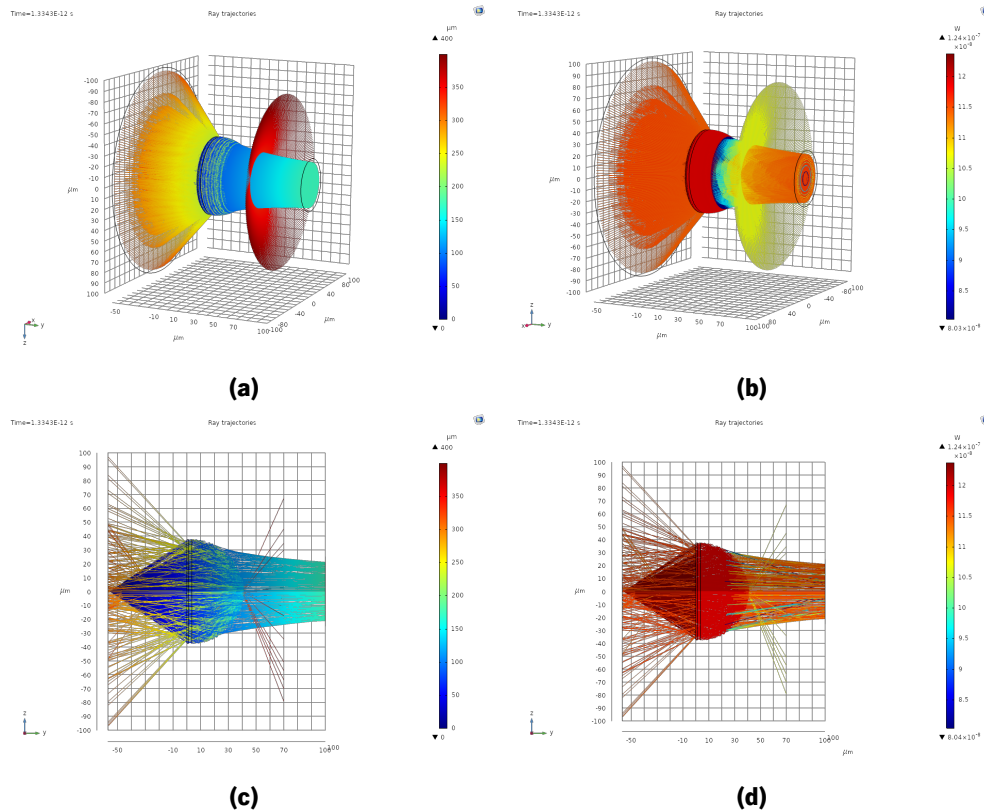


Figura 3.7: Resultado da simulação de traçado dos raios de luz de uma microlente em PDMS com altura de $40 \mu\text{m}$ e diâmetro de $75 \mu\text{m}$: (a) Traçado dos raios de luz com uma expressão de cor de distância percorrida; (b) Traçado dos raios de luz com uma expressão de cor de potência ótica; (c) Traçado de apenas 5% de raios de luz com uma expressão de cor de distância percorrida; (d) Traçado de apenas 5% de raios de luz com uma expressão de cor de potência ótica.

Na figura 3.8a, pode-se observar valores no detetor de irradiância máxima de $1,09 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ ou $1,09 \times 10^3 \text{ mW/mm}^2$ e mínima de aproximadamente de $0,15 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ ou 150 mW/mm^2 . Os valores máximos de irradiância encontram-se nos limites exteriores do feixe de luz, devido ao fenómeno de aberração esférica, descrita na secção 2.3.4.1. Na figura 3.8b, encontra-se representado o valor médio no detetor de irradiância de $3,1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ ou 310 mW/mm^2 . Os resultados obtidos cumprem assim o requisito mínimo optogenético de 1 mW/mm^2 [25, 29].

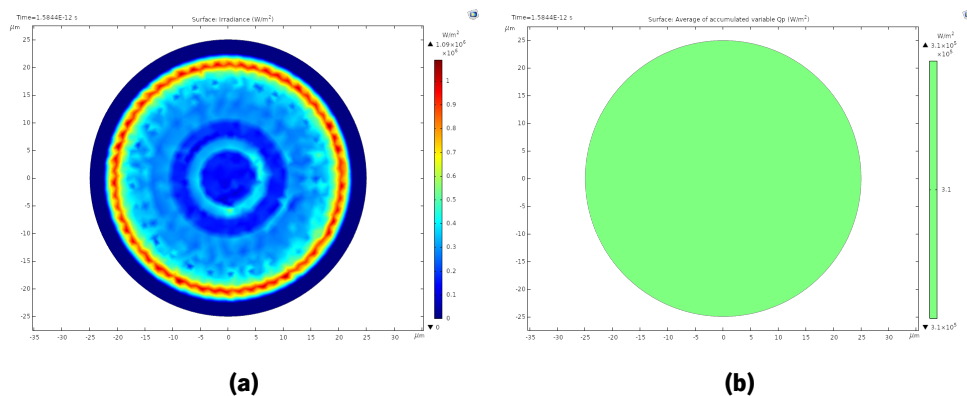


Figura 3.8: Resultado da simulação de irradiância num detetor atingido por um feixe de luz colimada por uma microlente em PDMS com altura de $40\ \mu\text{m}$ e diâmetro de $75\ \mu\text{m}$: (a) Distribuição de valores de irradiância obtidos no detetor; (b) Valor médio de irradiância obtido no detetor.

De seguida, foi realizada uma simulação para a determinação da distância focal da microlente em PDMS com altura de $40\ \mu\text{m}$ e diâmetro de $75\ \mu\text{m}$. Após a simulação, foi obtida uma distância focal de $68\ \mu\text{m}$, representada na figura 3.9a e figura 3.9b.

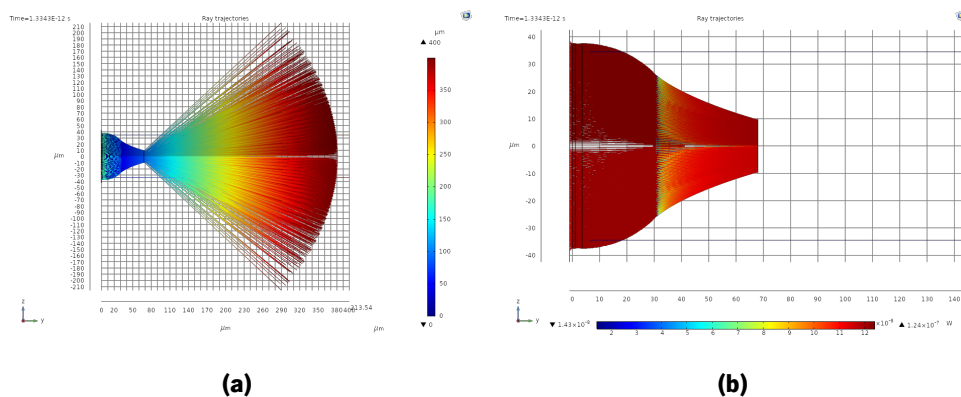


Figura 3.9: Resultado da simulação para a determinação da distância focal de uma microlente em PDMS com altura de $40\ \mu\text{m}$ e diâmetro de $75\ \mu\text{m}$: (a) Traçado dos raios de luz com uma expressão de cor de distância percorrida; (b) Traçado dos raios de luz com uma expressão de cor de potência ótica até à distância focal obtida de $68\ \mu\text{m}$.

Após a distância focal ter sido obtida, foi colocado um detetor a esta distância para a obtenção dos valores de irradiância na sua superfície (figura 3.10a). Os resultados obtidos no detetor mostram um círculo de menor confusão com diâmetro de $20\ \mu\text{m}$, uma irradiância máxima no seu centro de $7,15 \times 10^6\ \text{W}/\text{m}^2$ e mínima nos seus limites exteriores de aproximadamente $4,03 \times 10^5\ \text{W}/\text{m}^2$ (figura 3.10b).

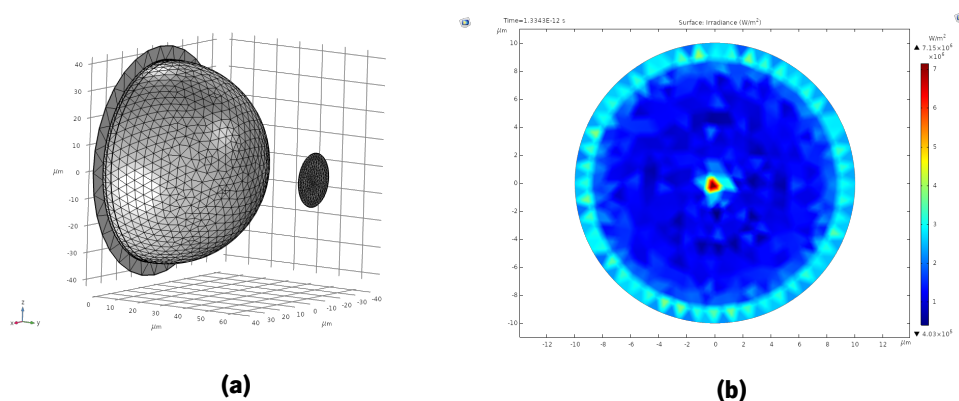


Figura 3.10: Resultado da simulação de irradiância num detetor posicionado à distância focal de uma microlente em PDMS com altura de 40 μm e diâmetro de 75 μm: (a) Malha e posição do detetor mais a microlente; (b) Distribuição de valores de irradiância obtidos no detetor.

3.3 Microlentes Assimétricas

Foi também desenhado no *software SOLIDWORKS* um modelo de microlente assimétrica (figura 3.11a), baseado na microlente fabricada por Hung *et al.* [53], com o objetivo de simular o direcionamento da luz emitida pelo microLED. O modelo possui uma base com um diâmetro de 80 μm, altura de 30 μm e deslocação do vértice da microlente num só eixo em 30° (figura 3.11b).

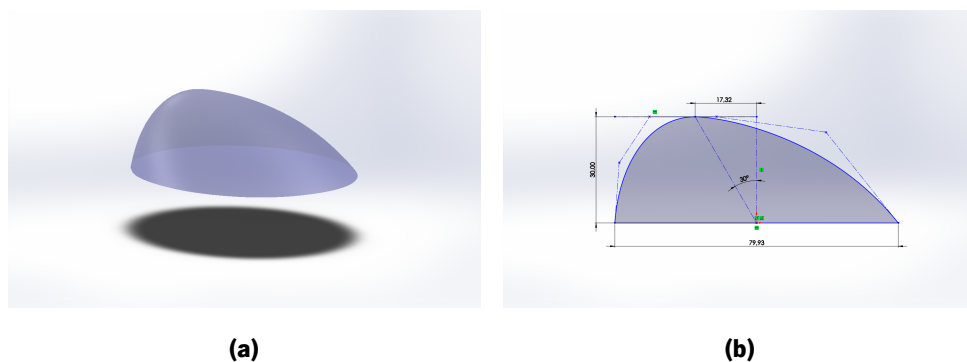


Figura 3.11: Aspeto e dimensões do modelo de microlente assimétrica desenhada em *SOLIDWORKS*: (a) Modelo da microlente assimétrica baseada na microlente fabricada por Hung *et al.* [53]; (b) Dimensões do modelo da microlente assimétrica.

Com o modelo desenhado, este foi importado para o *COMSOL Multiphysics* e realizado um estudo do traçado dos raios de luz. Após a importação, foi-lhe adicionada uma malha (figura 3.12), um detetor circular a 70 μm e mantidos os parâmetros de simulação descritos na secção 3.2.1. O detetor circular foi colocado a 70 μm da origem para se poder observar um traçado dos raios de luz mais completo, pois

existem raios de luz que não foram colimados a sair pela lateral da lente.

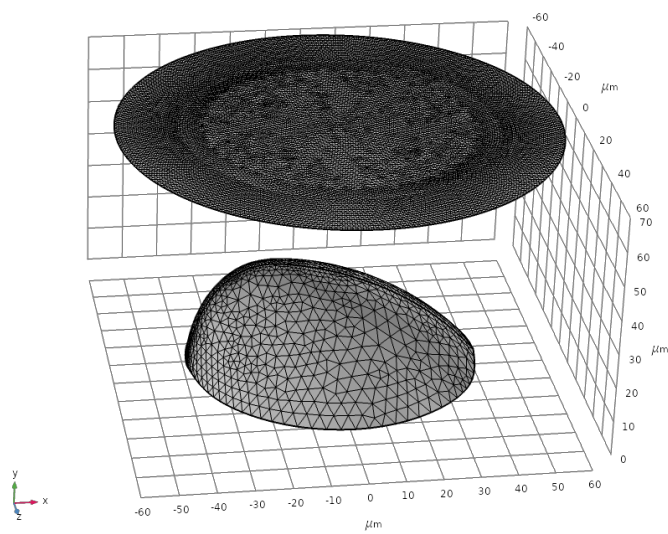


Figura 3.12: Malha aplicada ao modelo de microlente assimétrica.

Com a simulação concluída, pode-se observar na figura 3.13a e figura 3.13b, um traçado de raios de luz parcialmente colimado e com direcionamento dos raios de luz. Na figura 3.13c, pode-se verificar a distribuição dos raios de luz no detetor, após estes serem redirecionados pela microlente assimétrica, estando uma grande quantidade destes raios de luz concentrados em torno da origem do eixo-y e a aproximadamente $-30\ \mu\text{m}$ no eixo-x, com uma irradiância máxima de $4,99 \times 10^6\ \text{W}/\text{m}^2$ ou $4,99 \times 10^3\ \text{mW}/\text{mm}^2$.

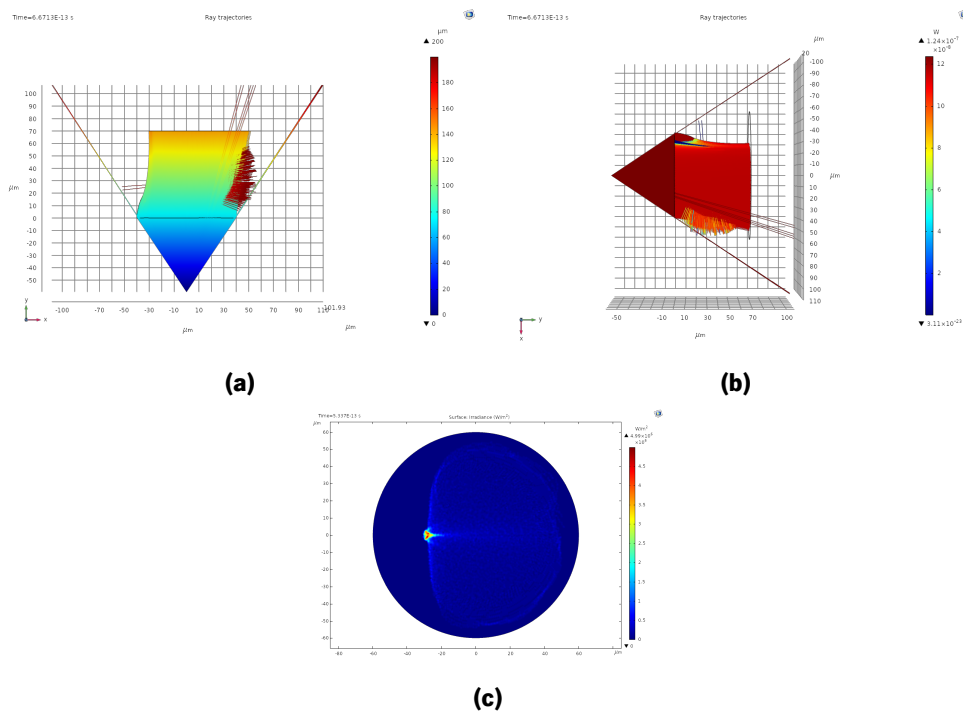


Figura 3.13: Resultado da simulação de traçado dos raios de luz de uma microlente assimétrica em PDMS: (a) Traçado dos raios de luz com uma expressão de cor de distância percorrida; (b) Traçado dos raios de luz com uma expressão de cor de potência ótica; (c) Distribuição de valores de irradiância obtidos no detector.

De seguida, foi realizada uma simulação para a determinação da distância focal da microlente assimétrica em PDMS. Após a simulação, foi obtida uma distância focal de 42 μm, representada na figura 3.14a e figura 3.14b. Devido à inclinação da microlente, verifica-se a fuga de raios de luz pelas laterais da microlente, quando lhe é aplicada uma fonte de luz colimada.

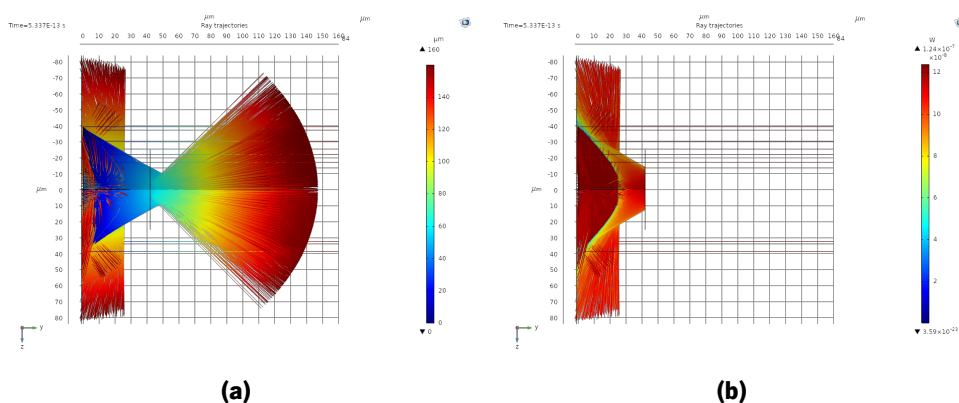


Figura 3.14: Resultado da simulação para a determinação da distância focal de uma microlente assimétrica em PDMS: (a) Traçado dos raios de luz com uma expressão de cor de distância percorrida; (b) Traçado dos raios de luz com uma expressão de cor de potência ótica até à distância focal obtida de 42 μm.

Após a distância focal ter sido obtida, foi colocado um detector a esta distância para a obtenção dos

valores de irradiância na sua superfície (figura 3.15a). Devido à inclinação da microlente, os resultados obtidos no detetor mostram a formação de uma imagem comática, descrita na secção 2.3.4.2, com uma irradiância máxima de $6,26 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ (3.15b).

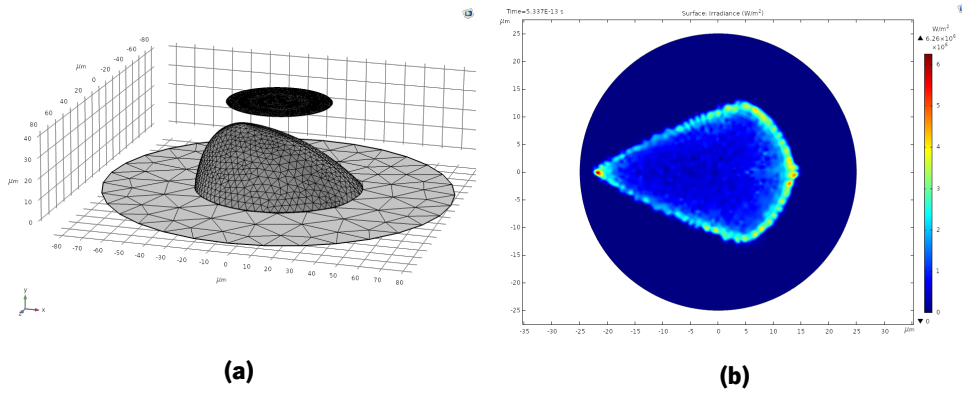


Figura 3.15: Resultado da simulação de irradiância num detetor posicionado à distância focal de uma microlente assimétrica: (a) Malha e posição do detetor mais a microlente; (b) Distribuição de valores de irradiância obtidos no detetor.

Capítulo 4

Metodologia

Este capítulo apresenta as diferentes metodologias utilizados no fabrico das microlentes, desde a conceção de moldes mestres em polímero fotossensível até a obtenção de microlentes em PDMS. São também descritos os diferentes métodos usados na caracterização física e ótica das estruturas fabricadas, incluindo as microlentes.

4.1 Fabrico das Microlentes

No processo de desenho e fabrico das microlentes, recorreu-se a três diferentes técnicas de microfabricação. A fotolitografia e o refluxo térmico para a criação do molde mestre em polímero fotossensível e a moldagem de réplicas para a obtenção do molde negativo e o desejado resultado final, as microlentes.

4.1.1 Fotolitografia

A fotolitografia é um processo de padronização no qual um polímero fotossensível é exposto seletivamente à luz, por utilização de uma máscara, deixando uma imagem latente no polímero que pode ser dissolvida seletivamente, proporcionando o acesso ao substrato de base [68]. Existem três tipos de polímeros fotossensíveis, positivo, negativo e inversão de imagem. No polímero fotossensível positivo, as partes expostas à luz tornam-se solúveis durante a sua revelação. Contrariamente, o polímero fotossensível negativo quando exposto à luz, torna-se insolúvel na revelação. O polímero fotossensível de inversão de imagem pode comporta-se como positivo ou negativo. Ao ser aplicada uma cura pós-exposição (PEB) este comporta-se como negativo durante a revelação. Se a PEB não for aplicada, comporta-se como positivo. Com estes diferentes tipos de comportamentos de polímeros fotossensíveis, um padrão numa máscara

cria diferentes tipos de resultados durante a revelação, representados na figura 4.1. A fotolitografia pode ser efetuada por diferentes tipos de técnicas dependentes na fonte de luz usada. As fontes de luz mais convencionais são as seguintes: (i) radiação UV para litografia ótica, (ii) raios-X para litografia galvânica (LIGA) e (iii) feixe de eletrões ou feixe de iões para litografia por feixe de partículas [69].

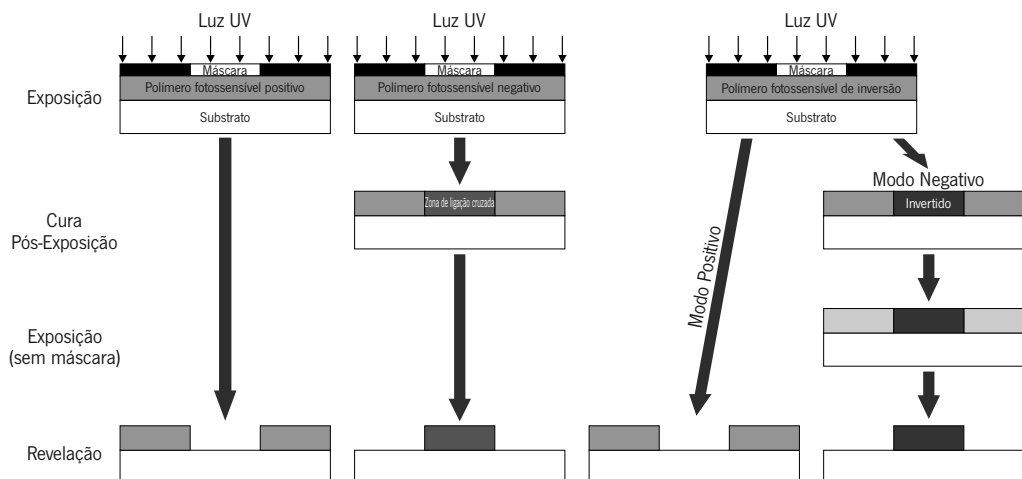


Figura 4.1: Esquemático da sequência de processo de polímeros fotossensíveis positivos (esquerda), negativos (centro) e inversão de imagem (direita) nos dois modos de funcionamento (adaptado de [70]).

O processo de fotolitografia usado na criação do molde mestre em polímero fotossensível dividiu-se nas seguintes etapas: (i) limpeza do substrato, (ii) revestimento do substrato com polímero fotossensível, (iii) cura do polímero fotossensível, (iv) exposição do polímero fotossensível por luz UV, (v) PEB do polímero fotossensível e (vi) revelação.

A limpeza do substrato de vidro foi efetuada através de um processo de duas etapas. A primeira etapa consistiu na imersão do substrato num banho de acetona com agitação ultrassónica (figura 4.2) para a remoção de impurezas orgânicas, seguida de uma limpeza com isopropanol (IPA), com o objetivo de remover os resíduos de acetona que podem deixar marcas no substrato [70].



Figura 4.2: Banho ultrassônico usado na remoção de impurezas orgânicas do substrato.

O revestimento do substrato de vidro por polímero fotossensível foi realizado através de um equipamento de *spin coating* Polos Spin150i da SPS (figura 4.3). Através da programação dos parâmetros de velocidade, aceleração e tempo, é possível fazer o revestimento do substrato com polímero fotossensível com diferentes espessuras.

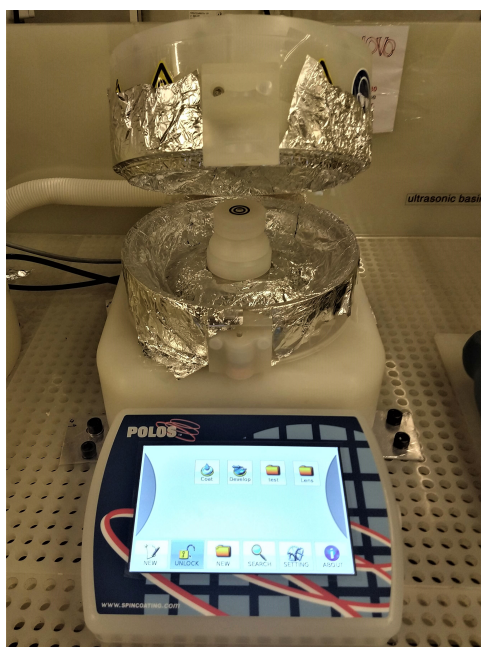


Figura 4.3: Equipamento de *spin coating* Polos Spin150i da SPS usado no revestimento do substrato por polímero fotossensível.

Após o revestimento do substrato, o filme de polímero fotossensível contém uma concentração resi-

dual de solvente típica de 10%–35%, dependendo da espessura do filme e do solvente. Os objetivos da cura são: tornar o polímero fotossensível sensível à luz UV, reduzir a concentração do solvente residual para evitar a contaminação e a aderência da máscara ao polímero fotossensível, prevenir a criação de bolhas de azoto durante a exposição do polímero fotossensível, promover a aderência do polímero fotossensível ao substrato, minimizar a erosão das zonas não expostas durante a revelação, e por fim, permitir múltiplos revestimentos sem a dissolução de outros polímeros fotossensíveis que possam estar presentes no substrato [70]. A cura do polímero fotossensível foi realizada numa placa de aquecimento *Präitherm PZ23-2* da *Harry Gestigkeit GmbH* (figura 4.4).



Figura 4.4: Placa de aquecimento *Präitherm PZ23-2* da *Harry Gestigkeit GmbH* usada na cura do polímero fotossensível.

Durante a exposição de polímeros fotossensíveis positivos baseados em diazonaftoquinona (DNQ) e polímeros fotossensíveis de inversão de imagem ocorre uma fotorreação onde o fotoiniciador, o sulfonato de DNQ, é convertido em ácido carboxílico indeno com a libertação de azoto e absorção de água. Na exposição de polímeros fotossensíveis positivos não baseados em DNQ, é apenas criado ácido sulfônico, fazendo com que o processo seja mais simples e rápido, mesmo com filmes de polímeros fotossensíveis espessos. Ao completar a fotorreação, as zonas expostas tornam-se solúveis durante a revelação, sendo assim transferidos os padrões das máscaras para o polímero fotossensível. A espessura do filme de polímero fotossensível, a profundidade de penetração da luz e o tempo de exposição, determinam o perfil de profundidade da dose de luz recebida. No caso dos filmes finos de polímeros fotossensíveis, filmes com uma espessura menor que a profundidade de penetração da luz usada, ocorre uma exposição praticamente homogénea. Um aumento na dose de luz até à conversão completa do fotoiniciador, resulta numa maior, mas maioritariamente homogénea, taxa de revelação até o substrato. No caso dos filmes espessos de polímeros fotossensíveis, filmes com uma espessura muito maior que a profundidade de penetração

da luz usada, estes filmes absorvem apenas nos micrômetros superiores durante o início da exposição, causando a descoloração do polímero fotossensível e a orientação da luz até profundidades superiores na direção do substrato, ao longo da exposição. Neste caso, a espessura de polímero fotossensível capaz de ser revelada, aumenta de um modo aproximadamente linear com a dose de exposição [70]. Os dois comportamentos descritos podem ser vistos na figura 4.5. A exposição do polímero fotossensível foi efetuada com o equipamento *Karl Suss MJB3* com uma lâmpada de vapor de mercúrio de 350 W, num comprimento de onda de luz UV de 365 nm (figura 4.6).

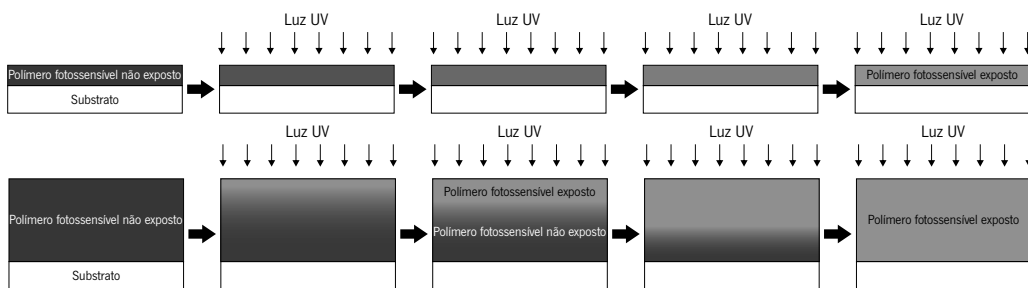


Figura 4.5: Comportamento dos polímeros fotossensíveis finos (linha superior) e espessos (linha inferior) quando expostos a luz UV (adaptado de [70]).



Figura 4.6: Equipamento *Karl Suss MJB3* usado na exposição do polímero fotossensível.

Existem polímeros fotossensíveis positivos que completam a fotorreação durante a exposição à luz UV. No entanto, existem outros polímeros fotossensíveis positivos, quimicamente amplificados, que necessitam de uma cura extra, denominada por PEB, para completar a fotorreação iniciada durante a exposição. Os polímeros fotossensíveis de inversão de imagem necessitam de uma PEB, usualmente referido por passo de inversão de imagem, para inverter as zonas expostas, tornando-as assim insolúveis durante a

revelação. No caso dos polímeros fotossensíveis negativos, uma PEB é necessária para criar a zona de ligação cruzada, iniciada durante a exposição, tornando-a assim insolúvel durante a revelação [70].

Após a fotorreação estar completa, é criada uma imagem latente no polímero fotossensível, com o padrão da máscara usada. As áreas expostas diferem quimicamente das áreas não expostas. O propósito da revelação é dissolver as áreas expostas, no caso dos polímeros fotossensíveis positivos, ou não expostas, no caso dos polímeros fotossensíveis negativos, mergulhadas numa solução aquosa alcalina, resultando nas estruturas desejadas [70]. A etapa de revelação foi realizada numa placa de aquecimento e agitação magnética *Agimixt* da *JP Selecta* (figura 4.7).



Figura 4.7: Placa de aquecimento e agitação magnética *Agimixt* da *JP Selecta* usada na revelação do polímero fotossensível.

4.1.1.1 Fotolitografia com os Polímeros Fotossensíveis *AZ[®] 4562* e *AZ[®] 5214E*

No fabrico do primeiro molde mestre foram utilizados dois polímeros fotossensíveis já disponíveis no laboratório. Na deposição do primeiro filme, foi usado o polímero fotossensível de inversão de imagem *AZ[®] 5214E* da *MicroChemicals*, no modo de funcionamento positivo [65]. A escolha do *AZ[®] 5214E* deveu-se às suas características de estabilidade térmica até uma temperatura aproximada de 130 °C e a criação de filmes com espessuras que variam entre os 1 µm–2 µm. Para a deposição do segundo filme, foi usado o polímero fotossensível positivo *AZ[®] 4562* da *MicroChemicals* [66]. A seleção do *AZ[®] 4562* deveu-se à sua capacidade de criar filmes com espessuras que variam entre os 5 µm–10 µm e ser possível efetuar refluxo térmico a partir dos 110 °C [70]. Após a otimização das várias etapas do

processo fotolitográfico do conjunto *AZ[®] 4562* e *AZ[®] 5214E*, foi obtida uma receita que produz quatro moldes mestres em simultâneo, com o objetivo de comprovar a sua reprodutibilidade.

A primeira etapa do processo fotolitográfico consistiu na limpeza dos substratos de vidro usados na deposição dos polímeros fotossensíveis. Os substratos foram imersos num banho de acetona com agitação ultrassónica durante 20 minutos a uma temperatura de 40 °C. Após o banho com agitação ultrassónico, a acetona foi removida dos substratos com a sequência: água destilada/IPA/água destilada. A secagem dos substratos foi realizada com azoto, seguida de 20 minutos a 110 °C na placa de aquecimento.

Após a limpeza dos substratos de vidro, procedeu-se à deposição do filme de *AZ[®] 5214E*, para se obter uma espessura de 1,14 µm de polímero fotossensível. A espessura desejada foi conseguida através da introdução dos parâmetros de configuração da tabela 4.1 no equipamento de *spin coating* na medição de 3 mL de polímero fotossensível num gobelé, sendo de seguida vertido calmamente e continuamente em cada substrato de vidro, de forma a não criar bolhas de ar.

Tabela 4.1: Parâmetros de configuração do equipamento de *spin coating* para obter um filme de 1,14 µm de espessura de *AZ[®] 5214E*.

Parâmetros	Primeiro Passo	Segundo Passo
Velocidade (rpm)	3000	6000
Aceleração (rpm/s)	3820	3820
Tempo (s)	8	22

Com a deposição efetuada, foi necessário tornar o filme de *AZ[®] 5214E* sensível à luz UV e promover a sua aderência ao substrato de vidro, através da realização de uma cura. As amostras foram colocadas na placa de aquecimento durante 10 minutos a 110 °C. Devido ao filme de *AZ[®] 5214E* ser agora sensível à luz UV, todo o processo de agora em diante, foi realizado só com uma lâmpada com filtro de luz UV, para não haver exposição indesejada do filme.

Após esta primeira cura, passou-se à deposição do polímero fotossensível *AZ[®] 4562*, para se obter uma espessura de 10 µm. A espessura desejada foi conseguida através da introdução dos parâmetros de configuração da tabela 4.2 no equipamento de *spin coating* e na medição de 3 mL de polímero fotossensível num gobelé, sendo de seguida vertido calmamente e continuamente em cada amostra, já revestida com um filme de *AZ[®] 5214E*.

Tabela 4.2: Parâmetros de configuração do equipamento de *spin coating* para obter um filme de 10 µm de espessura de AZ[®] 4562.

Parâmetros	Primeiro Passo	Segundo Passo
Velocidade (rpm)	500	1000
Aceleração (rpm/s)	2865	2865
Tempo (s)	3	27

Devido à espessura e viscosidade do filme de AZ[®] 4562, procedeu-se a uma evaporação de solventes durante 45 minutos numa caixa metálica com uma tampa furada, dentro de uma câmara limpa. Posteriormente, as amostras foram colocadas na placa de aquecimento durante 10 minutos a 110 °C, para tornar o filme de AZ[®] 4562 sensível à luz UV.

Como o AZ[®] 4562 é um polímero fotossensível positivo baseado em DNQ e o AZ[®] 5214E é um polímero fotossensível de inversão de imagem, estes necessitam de uma certa quantidade de água para completar a fotoreação durante a exposição, que lhes foi retirada durante as etapas de cura. Assim, as amostras foram colocadas dentro de uma caixa metálica tapada durante 30 minutos a reidratar.

Foram criadas várias máscaras em fotolito contendo matrizes de padrões circulares com diferentes diâmetros. Optou-se por usar uma máscara constituída por matrizes de padrões circulares, com 75 µm de diâmetro e diferentes espaçamentos entre os seus elementos. A utilização desta máscara teve em conta o menor diâmetro de padrões circulares possível para se obter uma impressão em fotolito com boa qualidade. A máscara final pode ser observada na figura 4.8. Como um dos polímeros fotossensíveis é positivo e o outro é um polímero fotossensível de inversão de imagem a funcionar no modo positivo, os padrões circulares foram preenchidos a preto para isolar o polímero fotossensível da luz UV, deixando assim uma imagem latente dos mesmos, após uma exposição de 114 segundos à luz UV.

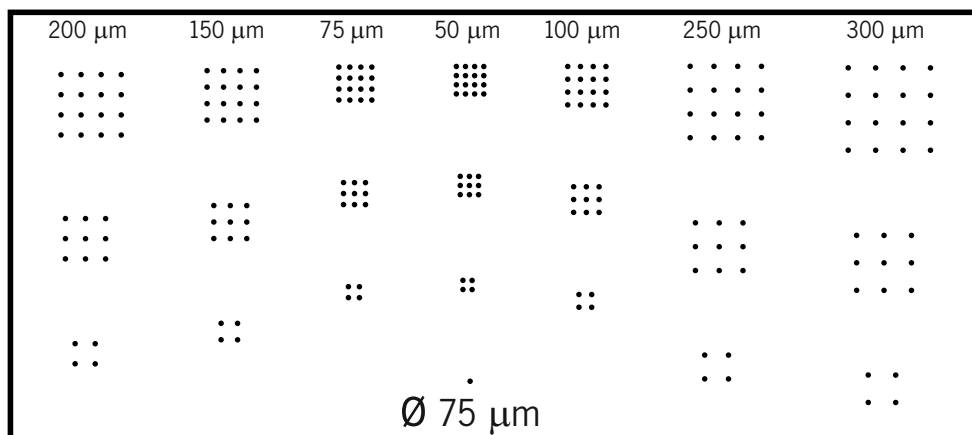


Figura 4.8: Máscara utilizada no processo fotolitográfico com padrões circulares com 75 μm de diâmetro impressa em fotolito. Os valores no topo da máscara indicam o espaçamento entre os padrões circulares dentro da sua respectiva matriz.

A etapa final foi a revelação dos polímeros fotossensíveis. Para efetuar a revelação das áreas expostas à luz UV e obter os cilindros em polímero fotossensível (figura 4.9), foi usado o revelador *AZ[®] 400K* da *MicroChemicals*. Foi preparada uma solução composta por 50 mL de *AZ[®] 400K* diluídos em 200 mL de água destilada. As amostras foram mergulhadas nesta solução e colocadas num agitador magnético para garantir uma revelação uniforme. A temperatura a que se encontra a solução é um fator crítico na taxa de revelação, sendo mantida uma temperatura constante (± 1 °C), numa gama de 20 °C–25 °C. A revelação foi realizada durante 6 minutos, em ciclos de 30 segundos. Ao fim de cada ciclo, as amostras foram enxaguadas com água desionizada para remover restos de polímero fotossensível revelados. Depois da revelação total das áreas expostas, as amostras foram limpas com água desionizada, secas com azoto e guardadas individualmente em caixas de Petri, devidamente identificadas com o número da amostra e processo fotolitográfico.



Figura 4.9: Estruturas cilíndricas obtidas no fim do processo fotolitográfico com os polímeros *AZ[®] 4562* e *AZ[®] 5214E*.

Conclui-se assim a primeira etapa da criação do molde mestre para o fabrico das microlentes. Na figura 4.10 está representado o esquemático do processo fotolitográfico, recorrendo a um corte transversal

das amostras.

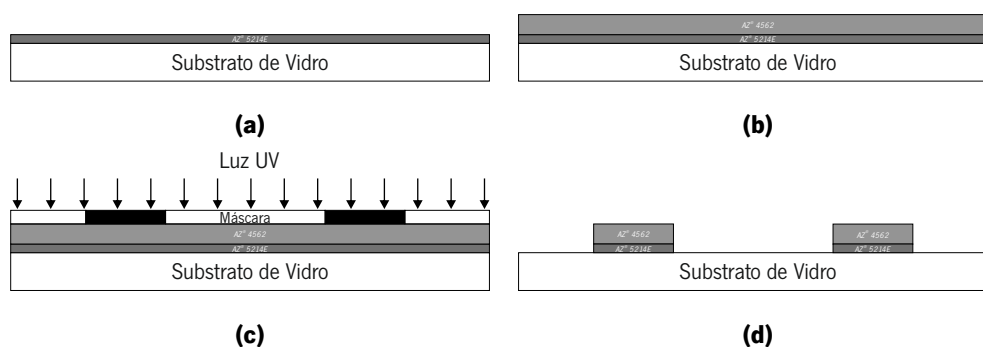


Figura 4.10: Esquemático do processo fotolitográfico para a criação do molde mestre com recurso a AZ[®] 4562 e AZ[®] 5214E: (a) Deposição de um filme de AZ[®] 5214E com uma espessura de 1,14 µm; (b) Deposição de um filme de AZ[®] 4562 com uma espessura de 10 µm; (c) Exposição da amostra à luz UV com recurso a uma máscara padronizada; (d) Revelação da amostra, sendo obtidos cilindros de polímeros fotossensíveis.

Durante todo o tempo em que foi desenvolvido e otimizado este processo fotolitográfico, estavam a decorrer as simulações apresentadas na secção 3.2.1, chegando-se à conclusão que as microlentes fabricadas em PDMS com uma altura de 10 µm não são capazes de colimar a luz emitida pelo microLED. Com esta conclusão, teve-se de estudar diferentes tipos de polímeros fotossensíveis apropriados ao fabrico de um molde mestre, que possa ser usado na produção de microlentes em PDMS capazes de colimar a luz. Contudo, o abandono total deste processo fotolitográfico não foi efetuado, pois as amostras fabricadas ajudariam no desenvolvimento e otimização de todos os processos futuros.

4.1.1.2 Fotolitografia com os Polímeros Fotossensíveis AZ[®] 40 XT e AZ[®] MIR 701

Após o processo fotolitográfico descrito na secção 4.1.1.1 ter sido colocado de parte, devido à obtenção de um molde mestre que iria fabricar microlentes incapazes de colimar a luz, partiu-se para o estudo de diferentes polímeros fotossensíveis capazes de fabricar o molde mestre desejado. O estudo de diferentes polímeros fotossensíveis, levou à seleção do polímero fotossensível positivo AZ[®] 40 XT da *MicroChemicals* [67]. O AZ[®] 40 XT é um polímero fotossensível positivo quimicamente amplificado, com características como: a criação de filmes com espessuras na gama dos 20 µm–65 µm, possibilidade de efetuar refluxo térmico a partir dos 110 °C, desnecessidade de reidratação após a primeira cura, excelente estabilidade ambiental e, por fim, exposição e revelação muito rápidas para espessuras elevadas [70].

Durante o processo de otimização do AZ[®] 40 XT, verificou-se que este polímero fotossensível é extremamente sensível à quantidade de luz UV a que é exposto. Quanto maior for o seu tempo de exposição,

maior é a quantidade de bolhas criadas, sendo assim necessário encontrar um compromisso entre tempo de exposição e quantidade de bolhas criadas, para se poder criar um molde mestre sem bolhas nas zonas padronizadas. Na figura 4.11a pode-se observar o efeito de diferentes tempos de exposição em diferentes amostras, logo após a PEB. Na figura 4.11b o tempo de exposição da amostra foram de 60 segundos, na figura 4.11c foram de 90 segundos e na figura 4.11d foram de 120 segundos.

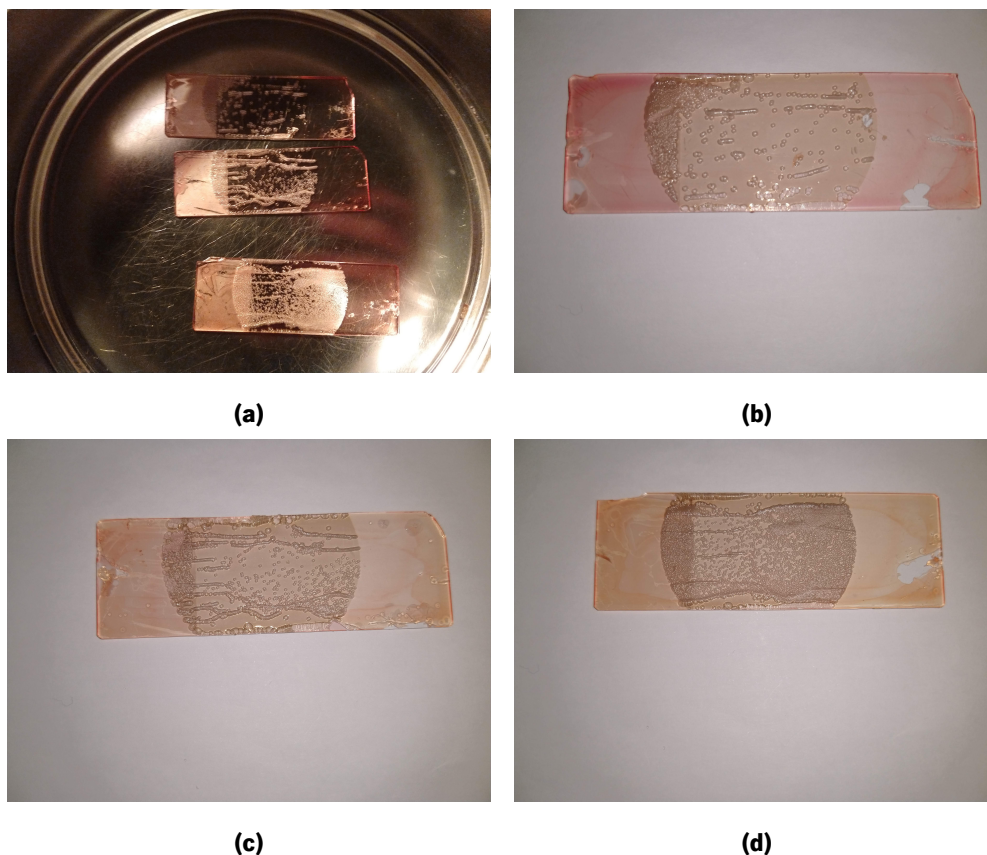


Figura 4.11: Efeito de diferentes tempos de exposição em diferentes amostras de *AZ[®] 40 XT* durante o seu processo de otimização: (a) Amostras de *AZ[®] 40 XT* logo após a sua PEB; (b) Amostra com 60 segundos de exposição; (c) Amostra com 90 segundos de exposição; (d) Amostra com 120 segundos de exposição.

Também durante o processo de otimização, tentou-se verificar se o *AZ[®] 40 XT* era compatível com o *AZ[®] 5214E*, devido à sua disponibilidade no laboratório. Contudo, como o *AZ[®] 40 XT* é um polímero fotossensível positivo quimicamente amplificado, este necessita de uma PEB para completar a fotorreação iniciada durante a exposição. Esta etapa não é compatível com o *AZ[®] 5214E* a funcionar no modo positivo. Devido à etapa de PEB, as zonas expostas à luz UV do filme depositado de *AZ[®] 5214E* são invertidas, tornando-as insolúveis na etapa de revelação. Ao verificar esta incompatibilidade, tentou-se diminuir o tempo e temperatura da PEB, para encontrar um compromisso entre os dois filmes depositados de polímeros fotossensíveis. Após várias tentativas, os resultados obtidos eram sempre os mesmos, estando sempre a camada inferior de *AZ[®] 5214E* invertida. Alguns exemplos desses resultados podem

ser observados na figura 4.12.

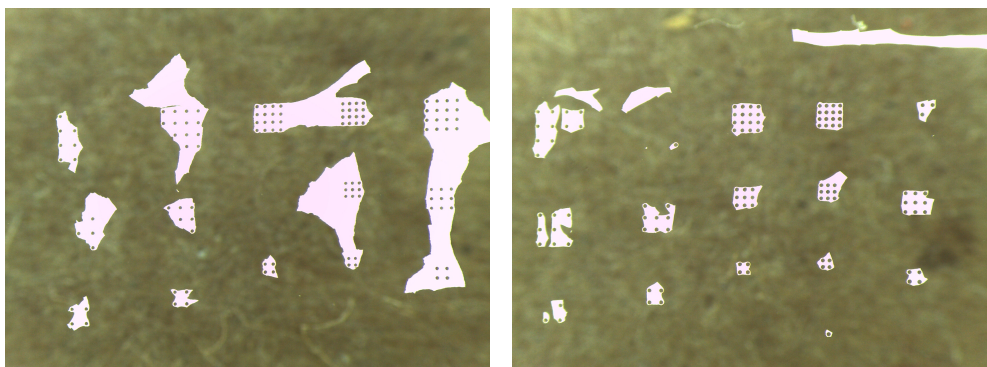


Figura 4.12: Exemplos da incompatibilidade dos polímeros *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] 5214E* após a revelação.

Com esta incompatibilidade, foi efetuado mais um estudo de diferentes polímeros fotossensíveis, desta vez com características semelhantes ao *AZ[®] 5214E*, mas que fosse compatível com o *AZ[®] 40 XT*. O estudo levou à seleção do polímero fotossensível *AZ[®] MIR 701* da *MicroChemicals* [71]. Como características do *AZ[®] MIR 701*, salienta-se a estabilidade térmica até uma temperatura aproximada de 130 °C, a criação de filmes com espessuras que variam entre os 0,8 µm–1,9 µm e a necessidade de uma PEB, sendo assim compatível com o *AZ[®] 40 XT* [70]. Após a otimização das várias etapas do processo fotolitográfico do conjunto de polímeros fotossensíveis *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701*, foi adaptada a receita descrita na secção 4.1.1.1.

A primeira etapa do processo fotolitográfico consistiu na limpeza dos substratos de vidro usados na deposição dos polímeros fotossensíveis. Os substratos foram imersos num banho de acetona com agitação ultrassónica durante 20 minutos a uma temperatura de 40 °C. Após o banho com agitação ultrassónico, a acetona foi removida dos substratos com a sequência: água destilada/IPA/água destilada. A secagem dos substratos foi realizada com azoto, seguida de 20 minutos a 110 °C na placa de aquecimento.

Após a limpeza dos substratos de vidro, procedeu-se à deposição do filme de *AZ[®] MIR 701*, para se obter uma espessura de 0,8 µm de polímero fotossensível. A espessura desejada foi conseguida através da introdução dos parâmetros de configuração da tabela 4.3 no equipamento de *spin coating* na medição de 3 mL de polímero fotossensível num gobelé, sendo de seguida vertido calmamente e continuamente em cada substrato de vidro preparado, de forma a não criar bolhas de ar.

Tabela 4.3: Parâmetros de configuração do equipamento de *spin coating* para obter um filme de 0,8 µm de espessura de AZ[®] MIR 701.

Parâmetros	Primeiro Passo	Segundo Passo
Velocidade (rpm)	3000	6000
Aceleração (rpm/s)	3820	3820
Tempo (s)	8	22

Com a deposição efetuada, foi necessário tornar o filme de AZ[®] MIR 701 sensível à luz UV e promover a sua aderência ao substrato de vidro, através da realização de uma cura. As amostras foram colocadas na placa de aquecimento durante 10 minutos a 110 °C. Devido ao filme de AZ[®] MIR 701 ser agora sensível à luz UV, todo o processo de agora em diante, foi realizado só com uma lâmpada com filtro de luz UV, para não haver exposição indesejada do filme.

Após a primeira cura, passou-se à deposição do polímero fotossensível AZ[®] 40 XT, para se obter uma espessura de 40 µm. A espessura desejada foi conseguida através da introdução dos parâmetros de configuração da tabela 4.4 no equipamento de *spin coating* e na medição de 3 mL de polímero fotossensível num gobelé, sendo de seguida vertido calmamente e continuamente em cada amostra, já revestida com um filme de AZ[®] MIR 701.

Tabela 4.4: Parâmetros de configuração do equipamento de *spin coating* para obter um filme de 40 µm de espessura de AZ[®] 40 XT.

Parâmetros	Primeiro Passo	Segundo Passo
Velocidade (rpm)	900	1800
Aceleração (rpm/s)	3820	3820
Tempo (s)	5	15

Devido à espessura e extrema viscosidade do filme de AZ[®] 40 XT (≈ 5000 cSt [70]), procedeu-se a uma evaporação de solventes durante 45 minutos numa caixa metálica com uma tampa furada, dentro de uma câmara limpa. Posteriormente, as amostras foram colocadas na placa de aquecimento durante 10 minutos a 110 °C, para tornar o filme de AZ[®] 40 XT sensível à luz UV.

De seguida, as amostras foram expostas à luz UV com a máscara da figura 4.8. Como ambos os polímeros fotossensíveis são positivos, os padrões circulares foram preenchidos a preto para os isolar da luz UV, deixando assim uma imagem latente dos mesmos, após uma exposição de 72 segundos à luz

UV.

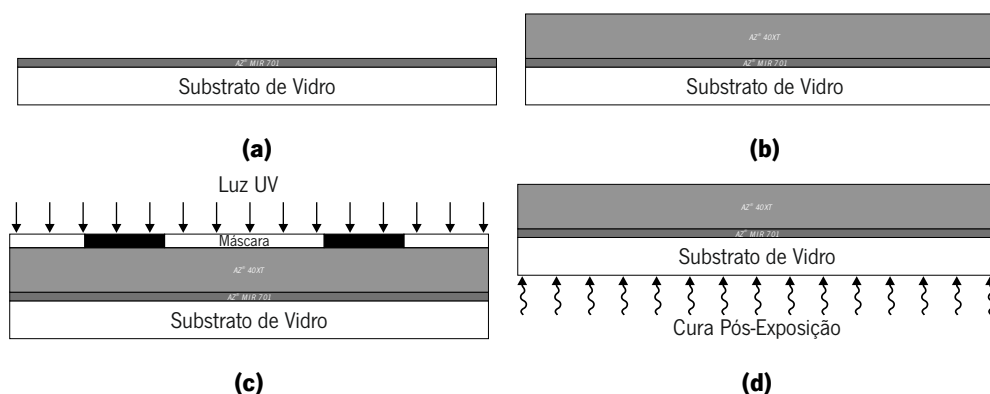
Após a exposição à luz UV, procedeu-se para a etapa de PEB, inexistente na receita descrita na secção 4.1.1.1. As amostras foram colocadas na placa de aquecimento durante 5 minutos a 100 °C, para completar a fotorreação iniciada durante a exposição.

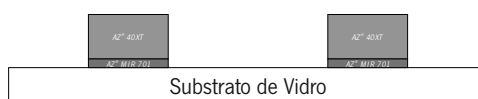
A etapa final realizada do processo fotolitográfico foi a revelação dos polímeros fotossensíveis. Para efetuar a revelação das áreas expostas à luz UV e a obtenção de cilindros em polímero fotossensível (figura 4.13), foi usado o revelador *AZ[®] 726 MIF* da *MicroChemicals*. Foi preparada uma solução de 200 mL de *AZ[®] 726 MIF*. As amostras foram mergulhadas no revelador e colocadas num agitador magnético para garantir uma revelação uniforme. A revelação foi realizada durante 6 minutos, em ciclos de 2 minutos. Ao fim de cada ciclo, as amostras foram enxaguadas com água desionizada para remover restos de polímero fotossensível revelados. Após a revelação total das áreas expostas, as amostras foram limpas com água desionizada, secas com azoto e guardadas individualmente em caixas de Petri, devidamente identificadas com o número da amostra e processo litográfico.



Figura 4.13: Estruturas cilíndricas obtidas no fim do processo fotolitográfico com os polímeros *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701*.

Conclui-se assim a primeira etapa da criação do molde mestre para o fabrico das microlentes. Na figura 4.14 está representado o esquemático do processo fotolitográfico, recorrendo a um corte transversal das amostras.





(e)

Figura 4.14: Esquemático do processo fotolitográfico para a criação do molde mestre com recurso a *AZ® 40XT* e *AZ® MIR 701*: (a) Deposição de um filme de *AZ® MIR 701* com uma espessura de 0,8 μm ; (b) Deposição de um filme de *AZ® 40XT* com uma espessura de 40 μm ; (c) Exposição da amostra à luz UV com recurso a uma máscara padronizada; (d) Cura pós-exposição da amostra; (e) Revelação da amostra, sendo obtidos cilindros dos polímeros fotossensíveis.

4.1.2 Refluxo Térmico

O refluxo térmico é um processo de amolecimento térmico das estruturas reveladas em polímero fotossensível, acima da sua T_g . Através de refluxo térmico, estruturas cilíndricas ou esféricas arredondadas de polímero fotossensível são criadas, podendo ser usadas como microlentes. Durante o refluxo térmico, a estrutura de polímero fotossensível tenta minimizar a sua área superficial ao ar, ao mesmo tempo que maximiza a interface com o substrato. A formação de microlentes só ocorre em estruturas com uma certa proporção altura/largura. Com proporções baixas, é formada uma estrutura com extremidades inchadas e uma depressão central [70].

4.1.2.1 Refluxo Térmico do Molde Mestre Fabricado com os Polímeros Fotossensíveis *AZ® 4562* e *AZ® 5214E*

Após o processo de otimização do refluxo térmico do molde mestre obtido na secção 4.1.1.1, as amostras foram submetidas a um perfil térmico ilustrado na figura 4.15. A utilização de um perfil térmico em rampa garante um refluxo térmico correto. Desta maneira, o polímero fotossensível é submetido a uma distribuição de temperatura constante, sem mudanças de temperatura bruscas até ser atingida a temperatura desejada para o refluxo térmico. Neste processo de refluxo térmico, a temperatura com os melhores resultados foi os 130 $^{\circ}\text{C}$, apesar da T_g do *AZ® 4562* ser os 110 $^{\circ}\text{C}$ [70, 72].

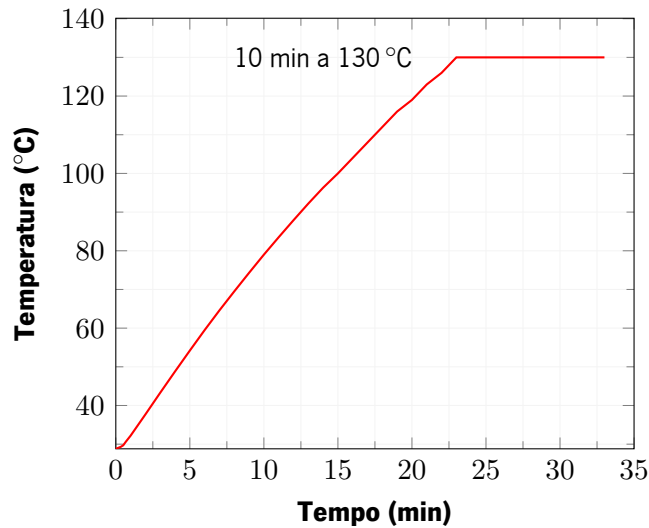


Figura 4.15: Perfil térmico usado na placa de aquecimento para o refluxo térmico do AZ^{\circledR} 4562.

A aplicação do perfil térmico da figura 4.15 ao molde mestre fabricado em AZ^{\circledR} 4562 e AZ^{\circledR} 5214E da figura 4.16a, levou à obtenção de um novo molde mestre representado na figura 4.16b.

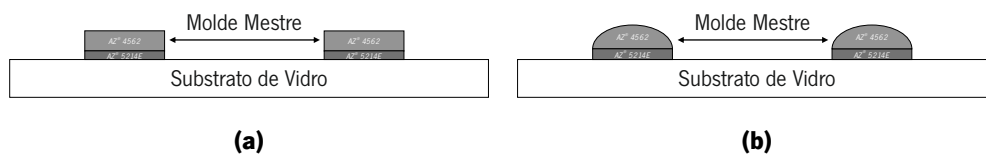


Figura 4.16: Refluxo térmico do molde mestre fabricado em AZ^{\circledR} 4562 e AZ^{\circledR} 5214E: (a) Molde mestre pré refluxo térmico; (b) Molde mestre pós refluxo térmico.

4.1.2.2 Refluxo Térmico do Molde Mestre Fabricado com os Polímeros Fotossensíveis AZ^{\circledR} 40 XT e AZ^{\circledR} MIR 701

Após o processo de otimização do refluxo térmico do molde mestre obtido na secção 4.1.1.2, as amostras foram submetidas a um perfil térmico ilustrado na figura 4.17. Devido à extrema sensibilidade à temperatura do AZ^{\circledR} 40 XT, verificada durante a sua otimização, foi utilizado um perfil térmico em rampa com um declive inferior e tempo na temperatura desejada muito inferior ao da secção 4.1.2.1. Neste processo de refluxo térmico, a temperatura com os melhores resultados foi os 120 °C, apesar da T_g do AZ^{\circledR} 40 XT ser os 110 °C [70].

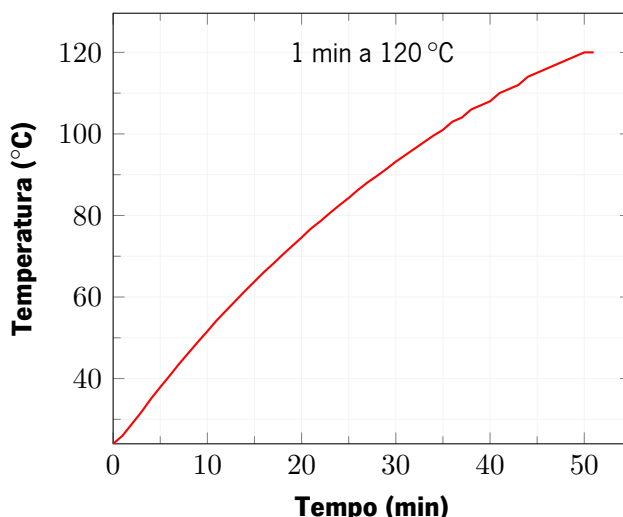


Figura 4.17: Perfil térmico usado na placa de aquecimento para o refluxo térmico do *AZ[®] 40 XT*.

A aplicação do perfil térmico da figura 4.17 ao molde mestre fabricado em *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701* da figura 4.18a, levou à obtenção de um novo molde mestre representado na figura 4.18b.

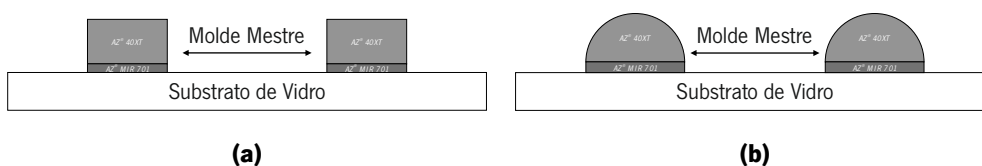


Figura 4.18: Refluxo térmico do molde mestre fabricado em *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701*: (a) Molde mestre pré refluxo térmico; (b) Molde mestre pós refluxo térmico.

4.1.2.3 Refluxo Térmico com Inclinação do Molde Mestre Fabricado com os Polímeros Fotossensíveis *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701*

Foi efetuado um refluxo térmico inclinado do molde mestre fabricado na secção 4.1.1.2, baseado no método proposto por Hung *et al.* [53], para a conceção de um molde mestre capaz de produzir microlentes assimétricas. Para tal, foram projetados e fabricados suportes em alumínio com diferentes ângulos de inclinação, onde possam ser colocadas amostras de vidro usadas como substrato. Todos os suportes apresentados na figura 4.19 possuem uma altura máxima de 5,5 cm, comprimento de 16 cm, largura de 3,3 cm e inclinações de 45°, 55°, 65°, 75°, 85° e 90°. Estas medidas devem-se ao requisito de os suportes serem colocados numa placa de aquecimento e cobertos por uma caixa metálica circular com uma altura de 6 cm e diâmetro de 19 cm, para manter uma atmosfera com uma temperatura constante e estável. O comprimento deve-se também às dimensões das amostras de vidro, 7,6 cm x 1 mm x 2,6 cm, usadas no laboratório.

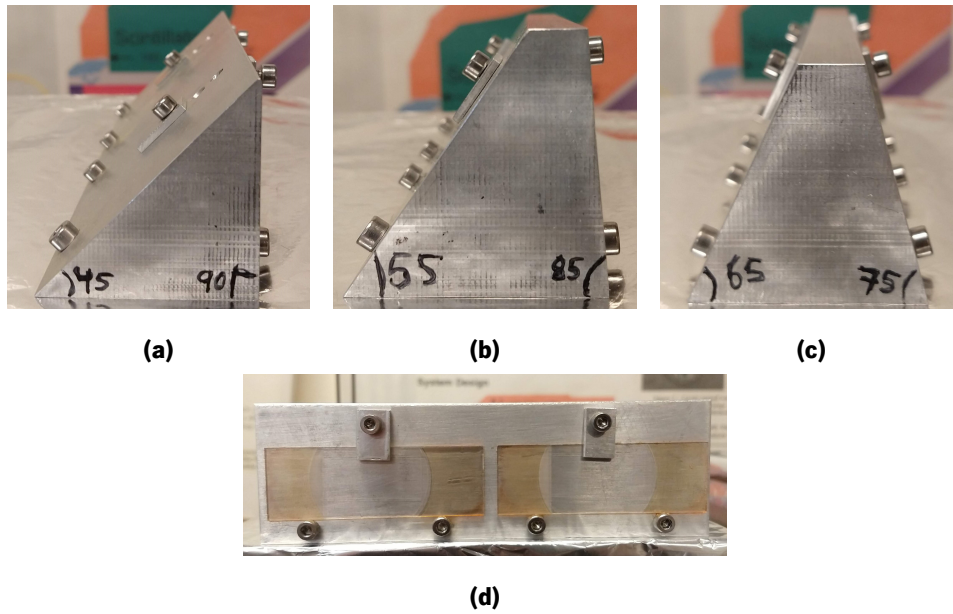


Figura 4.19: Suportes fabricados em alumínio para efetuar refluxo térmico de amostras com diferentes inclinações.

A aplicação do perfil térmico da figura 4.17 ao molde mestre fabricado em *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701* da figura 4.20a, levou à obtenção de um novo molde mestre representado na figura 4.20b.

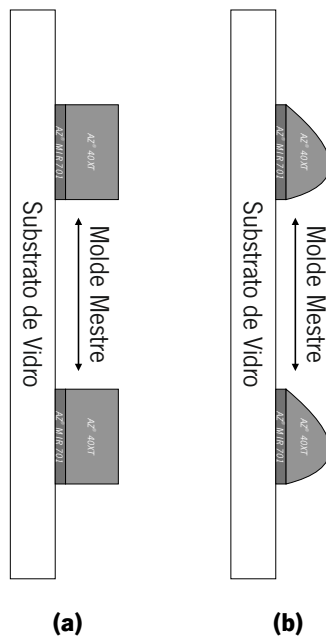


Figura 4.20: Refluxo térmico do molde mestre fabricado em *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701* com inclinação: (a) Molde mestre pré refluxo térmico com inclinação; (b) Molde mestre pós refluxo térmico com inclinação.

4.1.3 Moldagem de Réplicas

Após a criação do molde mestre através dos processos de fotolitografia e de refluxo térmico, foi então necessário recorrer ao processo de moldagem de réplicas em PDMS para a criação do molde negativo e das microlentes. Para a obtenção do PDMS, foi usado o conjunto *SYLGARD® 184 Silicone Elastomer* da *DOW*, composto por uma base e um agente de cura, a ser misturados numa razão 10 (base) para 1 (agente de cura), consoante o peso desejado. Após a base e o agente de cura serem misturados manualmente, uma quantidade grande de bolhas de ar é criada, sendo necessário a sua remoção através de uma câmara de vácuo. De seguida é necessário proceder a uma cura do PDMS, para no fim se proceder ao desmolde do molde negativo. Todo este processo encontra-se sintetizado na figura 4.21. A bomba de vácuo usada em conjunto com uma câmara de vácuo na remoção das bolhas de ar presas na mistura de PDMS foi a *Varian DS 120* da *Agilent Technologies* (figura 4.22).

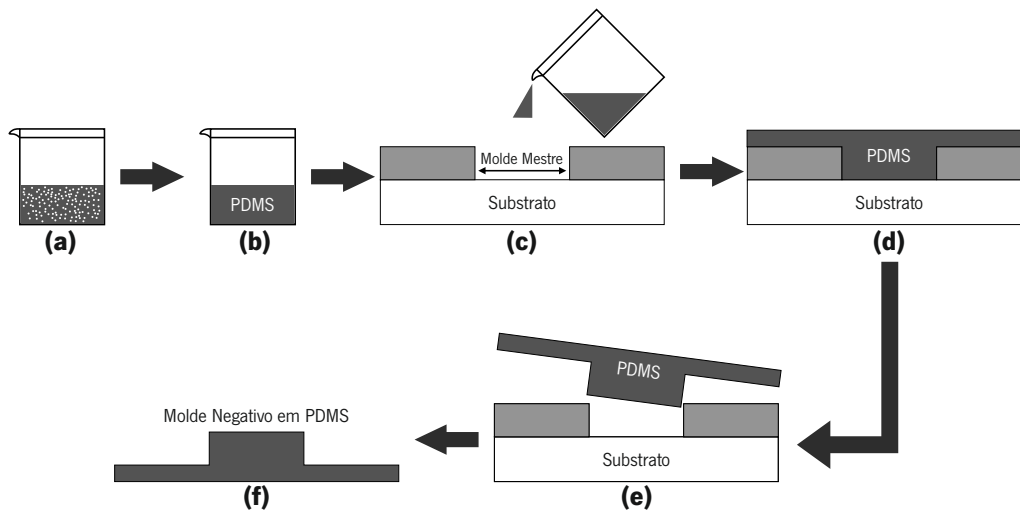


Figura 4.21: Processo de criação de moldes negativos em PDMS: (a) Misturar base e agente de cura numa razão 10:1; (b) Remoção de bolhas de ar presas no PDMS; (c) Verter o PDMS sobre o molde mestre; (d) Curar o PDMS; (e) Desmolde do molde negativo em PDMS; (f) Molde negativo em PDMS obtido.

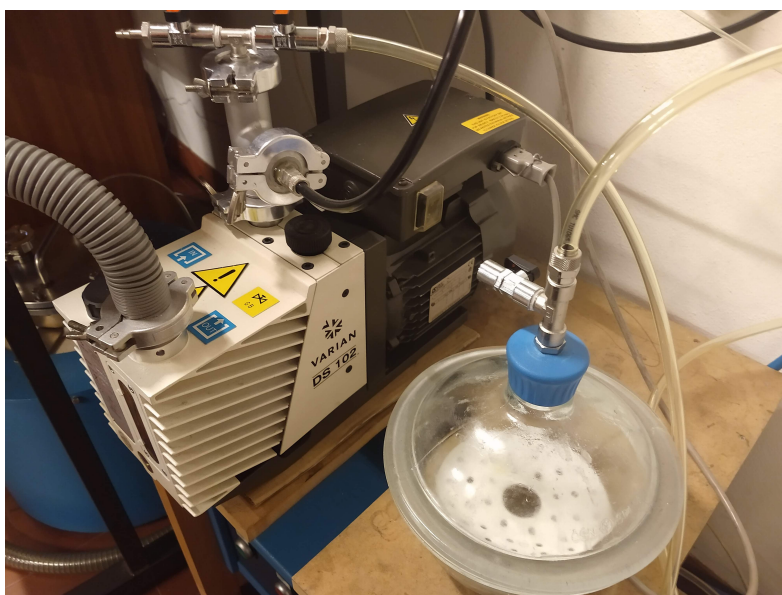


Figura 4.22: Bomba de vácuo *Varian DS 120* da *Agilent Technologies* e câmara de vácuo usadas na remoção de bolhas de ar presas na mistura de *SYLGARD® 184 Silicone Elastomer*.

4.1.3.1 Processo de Criação do Molde Negativo em PDMS

O processo de fabrico do molde negativo em PDMS, através de um molde mestre em polímero fotossensível, consistiu na utilização do conjunto *SYLGARD® 184 Silicone Elastomer*, misturando 4 mL de base e 0,4 mL de agente de cura. Após os dois compostos serem misturados manualmente num gobelé, a mistura foi colocada em uma câmara de vácuo, até todas as bolhas de ar presas no elastómero serem removidas. De seguida, o PDMS criado foi vertido calmamente e continuamente, para evitar a criação de bolhas de ar, sobre o molde mestre. Para evitar que não seja perdido PDMS e este seja depositado uniformemente, o molde mestre foi delimitado por uma barreira de fita-cola de alumínio. Posteriormente, procedeu-se à cura do PDMS numa placa de aquecimento durante 1 hora a 80 °C. Com a cura finalizada, seguiu-se o desmolde e obtenção do molde negativo em PDMS. Na figura 4.23 está representado o esquemático do processo descrito anteriormente.

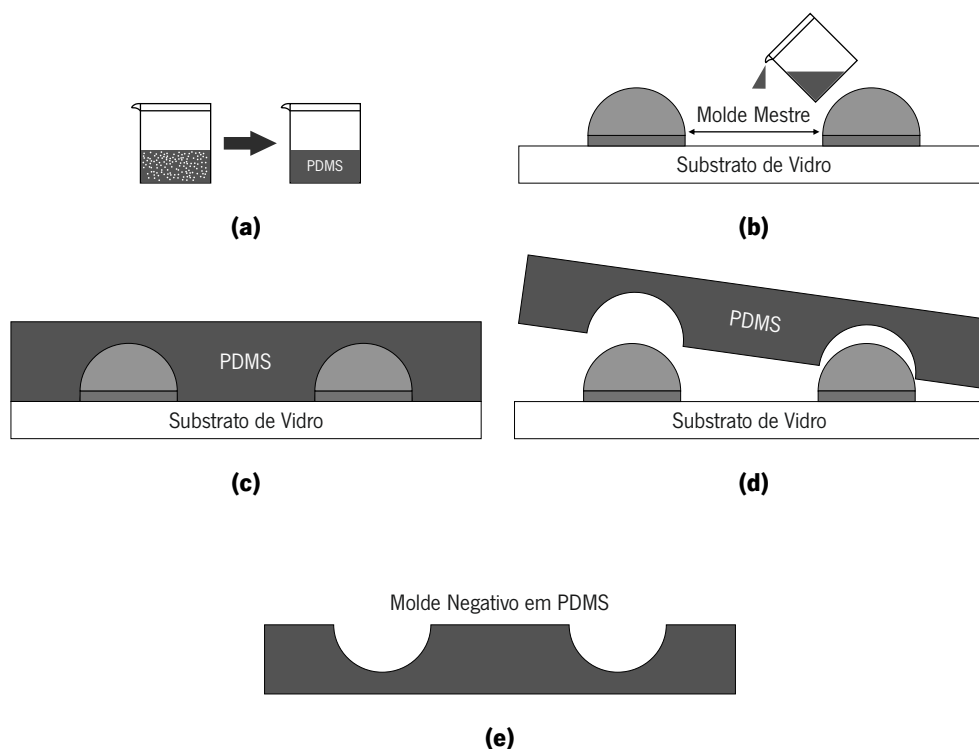


Figura 4.23: Esquemático do processo de fabricação do molde negativo em PDMS com recurso a um molde mestre: (a) Mistura manual de 4 mL de base e 0,4 mL de agente de cura e remoção de bolhas de ar presas no PDMS numa câmara de vácuo; (b) Verter o PDMS sobre o molde mestre; (c) Cura do PDMS numa placa de aquecimento durante 1 hora a 80 °C; (d) Desmolde do molde negativo em PDMS; (e) Molde negativo em PDMS obtido.

4.1.3.2 Processo de Criação das Microlentes em PDMS

A criação de microlentes em PDMS, através de um molde negativo em PDMS, consistiu na utilização do conjunto *SYLGARD® 184 Silicone Elastomer*, misturando 2 mL de base e 0,2 mL de agente de cura. Após os dois compostos serem misturados manualmente num gobelé, a mistura foi colocada em uma câmara de vácuo, até todas as bolhas de ar presas no elastómero serem removidas. De seguida, o PDMS criado foi vertido calmamente e continuamente, para evitar a criação de bolhas de ar, sobre o molde negativo em PDMS. Para evitar que não seja perdido PDMS e este seja depositado uniformemente, o molde negativo foi delimitado por uma barreira de fita-cola de alumínio. Posteriormente, procedeu-se à cura do PDMS numa placa de aquecimento durante 40 minutos a 80 °C. Com a cura finalizada, seguiu-se o desmolde e obtenção das microlentes em PDMS. Na figura 4.24 está representado o esquemático do processo descrito anteriormente.

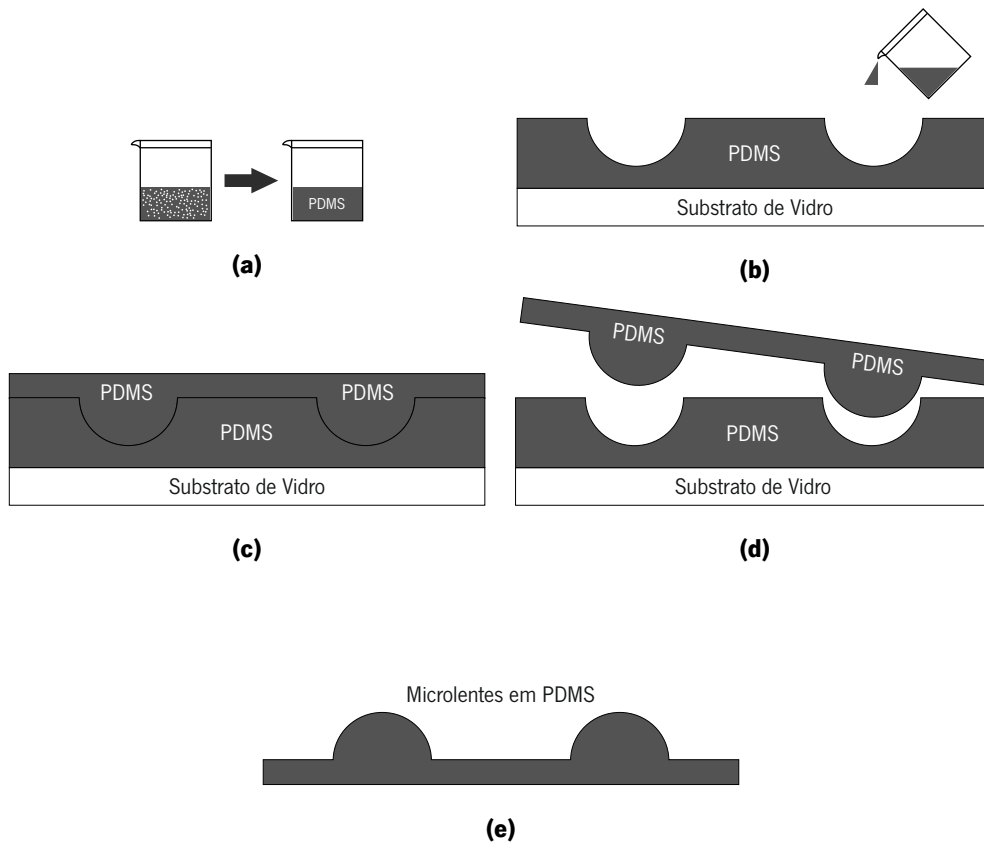


Figura 4.24: Esquemático do processo de fabrico de microlentes em PDMS com recurso a um molde negativo em PDMS: (a) Mistura manual de 2 mL de base e 0,2 mL de agente de cura e remoção de bolhas de ar presas no PDMS numa câmara de vácuo; (b) Verter o PDMS sobre o molde mestre; (c) Cura do PDMS numa placa de aquecimento durante 40 minutos a 80 °C; (d) Desmolde das microlentes em PDMS do molde negativo em PDMS; (e) Microlentes em PDMS obtidas.

4.2 Métodos de Caraterização das Estruturas Fabricadas

A caraterização das estruturas fabricadas (moldes mestre, moldes negativos e microlentes) são requisitos essenciais para otimizar e caraterizar o processo de fabrico [73]. Foram utilizadas diferentes técnicas, tais como, perfilometria de contacto, perfilometria ótica 3D, microscopia de força atómica (AFM) e microscopia eletrónica de varrimento (SEM). Todos estes métodos, irão ser descritos de seguida, possibilitam a determinação de diversas caraterísticas das microlentes fabricadas, como o perfil, a rugosidade, etc.

4.2.1 Perfilometria de Contacto

A perfilometria de contacto consiste numa análise topográfica em duas dimensões, através da deslocação de um estilete sobre a superfície de uma amostra. Tipicamente, o diâmetro da ponta do estilete é na ordem de alguns micrómetros, limitando assim a resolução lateral do equipamento. Contudo, a precisão da resolução vertical pode ser inferior a 1 nm. Durante a análise topográfica, podem ocorrer artefactos devido à geometria do estilete, superfície e intervalo de amostragem, ilustrados na figura 4.25 [73, 74, 75]. O perfilómetro de contacto usado foi o *Dektak 150* da *Veeco*, com um estilete de 45° e 12,5 µm de diâmetro da ponta.

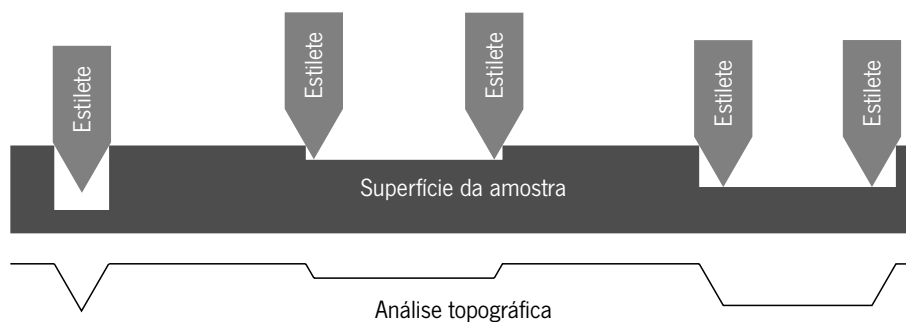


Figura 4.25: Artefactos causados durante uma análise topográfica por perfilometria de contacto. O perfil criado apresenta rampas e depressões, devido às limitações da geometria do estilete.

4.2.2 Perfilometria Ótica 3D

A perfilometria ótica 3D usada foi a interferometria de luz branca. Um esquemático da interferometria de luz branca encontra-se representado na figura 4.26. Este método de perfilometria ótica sem contacto possui uma resolução vertical aproximada de 0,1 nm e uma resolução lateral aproximada de 0,5 µm. Uma luz branca é separada em dois feixes de luz, um feixe de referência e um feixe de medição. Enquanto o feixe de referência é guiado para um espelho de referência, o feixe de medição é refletido na direção da superfície da amostra. De seguida, o feixe de referência é refletido pelo espelho de referência para uma câmara, formando um padrão de interferências. O feixe de medição é refletido pela superfície da amostra e captado pela câmara, formando assim uma imagem. Como o interferómetro de luz branca é projetado para ambas as trajetórias dos feixes serem iguais, a rugosidade da amostra da superfície leva a que estas trajetórias sejam diferentes, resultando num padrão de interferências [75]. O perfilómetro ótico 3D usado foi o *Profilm3D* da *FILMETRICS*.

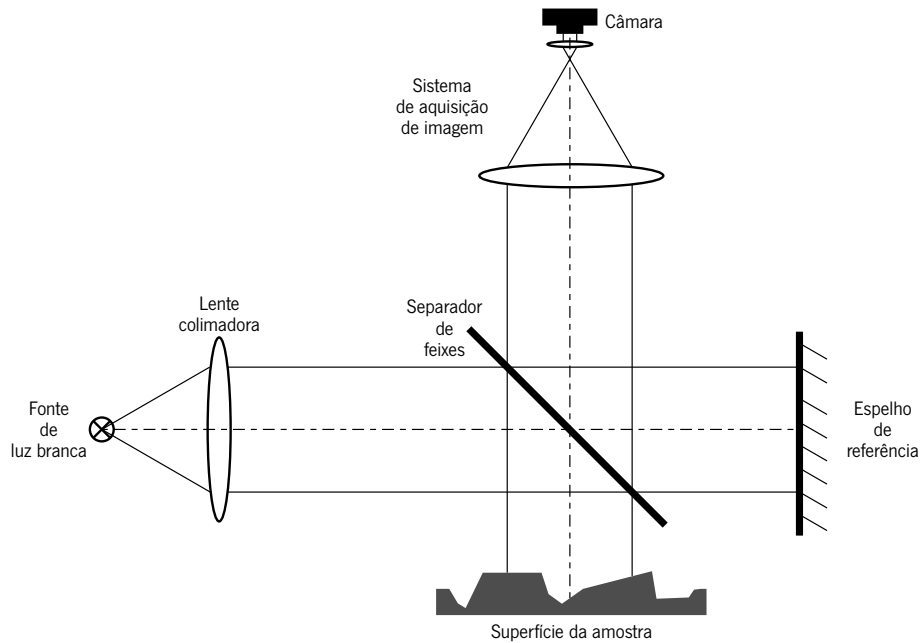


Figura 4.26: Esquemático da interferometria de luz branca (adaptado de [76]).

4.2.3 Microscopia de Força Atômica (AFM)

A microscopia de força atômica (AFM) é uma descendente da perfilometria de contacto e da microscopia de varrimento com efeito de túnel (STM). Um estilete com uma ponta de 10 nm é colocado na ponta livre de um cantiléver. Podem ser usadas pontas com diversas formas, tais como, cónica, quadrangular e trapezoidal. O formato do cantiléver determina as suas propriedades físicas, especialmente a constante de força, na gama dos 0,1 N/m–50 N/m, e a frequência de ressonância, na gama dos 1 kHz–1 MHz. O cantiléver é afixado a um scâner piezoelétrico, controlando a posição (x, y, z) da ponta. A deflexão do cantiléver, à medida que é deslocado sobre uma superfície, é medida por um sistema a laser e um detetor de quadrantes, que determina a direção da reflexão do laser (figura 4.27) [75].

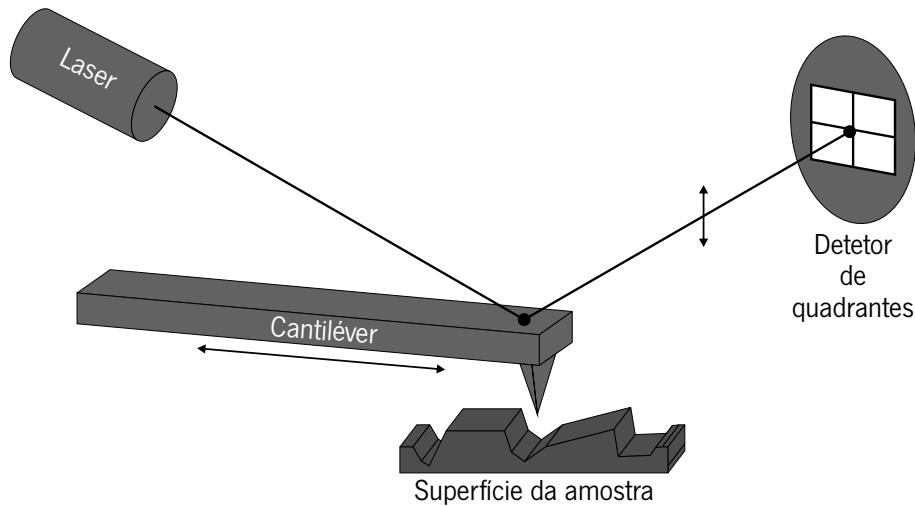


Figura 4.27: Esquemático de um equipamento AFM (adaptado de [75]).

A ponta interage com a superfície da amostra via força van der Waals, possuindo uma ação de repulsão no campo próximo e ação de atração quando separadas. As duas regiões de operação de um equipamento AFM encontram-se indicadas na figura 4.28. Dois dos modos de operação de um AFM baseiam-se no efeito de forças repulsivas, sendo estes, o modo de contacto e o modo de toque intermitente. No modo de toque intermitente, a ponta toca suavemente na superfície, oscilando a uma frequência próxima da frequência de ressonância do cantilêver. O efeito de atração proporciona o modo de funcionamento sem contacto [74, 75]. O AFM usado foi o *Dimension Icon* da *BRUKER*, em modo de contacto e em modo de toque intermitente.

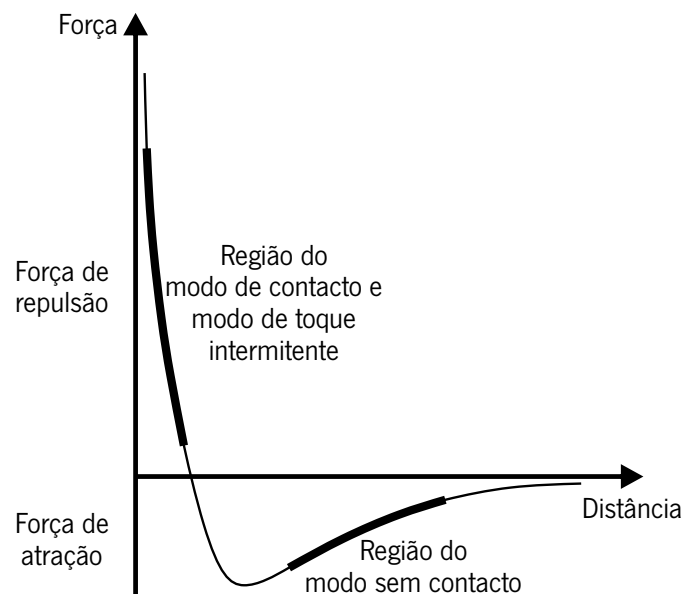


Figura 4.28: Curva van der Waals com regiões e modos de funcionamento de um equipamento AFM (adaptado de [74, 75]).

4.2.4 Microscopia Eletrônica de Varrimento (SEM)

A microscopia eletrônica de varrimento (SEM) é uma ferramenta de caracterização indispensável para sistemas em escala nanométrica e micrométrica. Na figura 4.29a pode-se visualizar o design de um SEM. Este contém elementos para a focagem de um feixe de elétrons numa amostra [75].

Os elétrons são emitidos através de uma fonte e acelerados até uma pequena abertura por uma diferença de potencial. O feixe de elétrons é colimado através de uma abertura e focado num ponto pequeno na superfície da amostra. Um conjunto de bobines de deflexão varrem e direcionam o feixe de elétrons ao longo da superfície da amostra. O feixe de elétrons ao chegar à superfície da amostra produz elétrons retrodifundidos (balísticos) e elétrons secundários (figura 4.29b). Os elétrons retrodifundidos possuem valores de energia altos, trajetória em linha reta e fornecem informação quantitativa sobre os elementos constituintes da amostras. Os elétrons secundários são emitidos da superfície da amostra, após o feixe de elétrons se dispersar sobre a mesma. Os elétrons secundários possuem energia relativamente baixa e são desviados por uma tensão baixa para um detetor, sendo o rendimento dos elétrons secundários usado para criar uma imagem da superfície da amostra [75].

Para a realização de análises SEM em amostras não condutoras, é depositado um filme fino de ouro (tipicamente) por pulverização catódica [75]. O SEM usado foi o *Nova NanoSEM 200* da *FEI* e o equipamento para a deposição do filme fino condutor por pulverização catódica foi o *208HR* da *Cressington*.

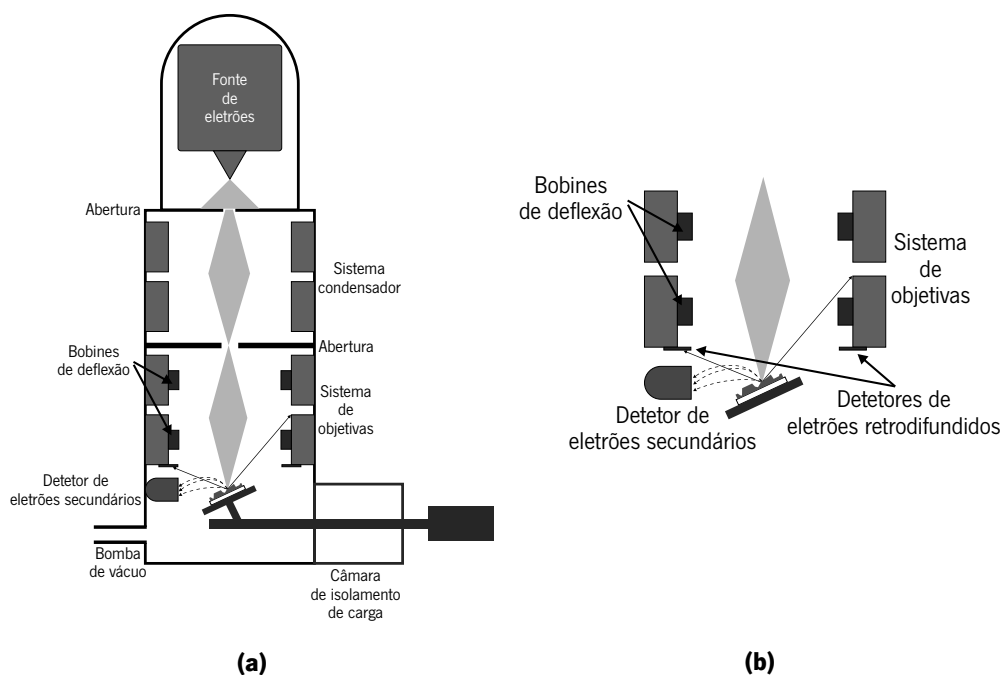


Figura 4.29: Esquemático de um equipamento SEM: (a) Principais componentes de um equipamento SEM; (b) Vista detalhada da interação do feixe de elétrons com a superfície da amostra (adaptado de [75]).

Capítulo 5

Resultados Experimentais

Este capítulo apresenta os vários resultados experimentais obtidos durante as diferentes fases de fabrico das microlentes em PDMS. Os resultados foram obtidos através dos métodos de caracterização de perfilometria de contacto, perfilometria ótica 3D, AFM e SEM.

5.1 Resultados Obtidos com os Polímeros Fotossensíveis *AZ[®] 4562 e AZ[®] 5214E*

Após o processo de fabrico das microlentes em PDMS, com recurso ao conjunto *AZ[®] 4562 e AZ[®] 5214E*, passou-se à caracterização física das diferentes estruturas fabricadas, através dos métodos de perfilometria de contacto, perfilometria ótica 3D, AFM e SEM.

Na figura 5.1, pode-se observar os resultados obtidos com a perfilometria de contacto para as várias estruturas fabricadas: molde mestre, molde negativo e microlente em PDMS. Ao analisar a figura 5.1a e a figura 5.1b, pode-se observar o efeito do refluxo térmico, quando este é aplicado ao molde mestre, passando de um perfil com bastantes irregularidades, a um perfil suave, de acordo com o perfil característico de uma microlente. A figura 5.1c, apresenta o perfil côncavo do molde negativo de acordo com o esperado. A figura 5.1d, apresenta o perfil da microlente em PDMS. Pode-se observar uma ligeira ondulação do perfil na parte decrescente da curva. Estas ondulações estão certamente associadas à movimentação da agulha do perfilómetro e à força que esta aplica na superfície do PDMS (material com elevada flexibilidade) quando percorre um perfil descendente. Na figura 5.1e, encontra-se representada uma comparação dos diferentes perfis de cada estrutura fabricada, verificando-se que o perfil, o diâmetro de aproximadamente 80 μm e a altura de aproximadamente 8 μm são mantidas ao longo do processo.

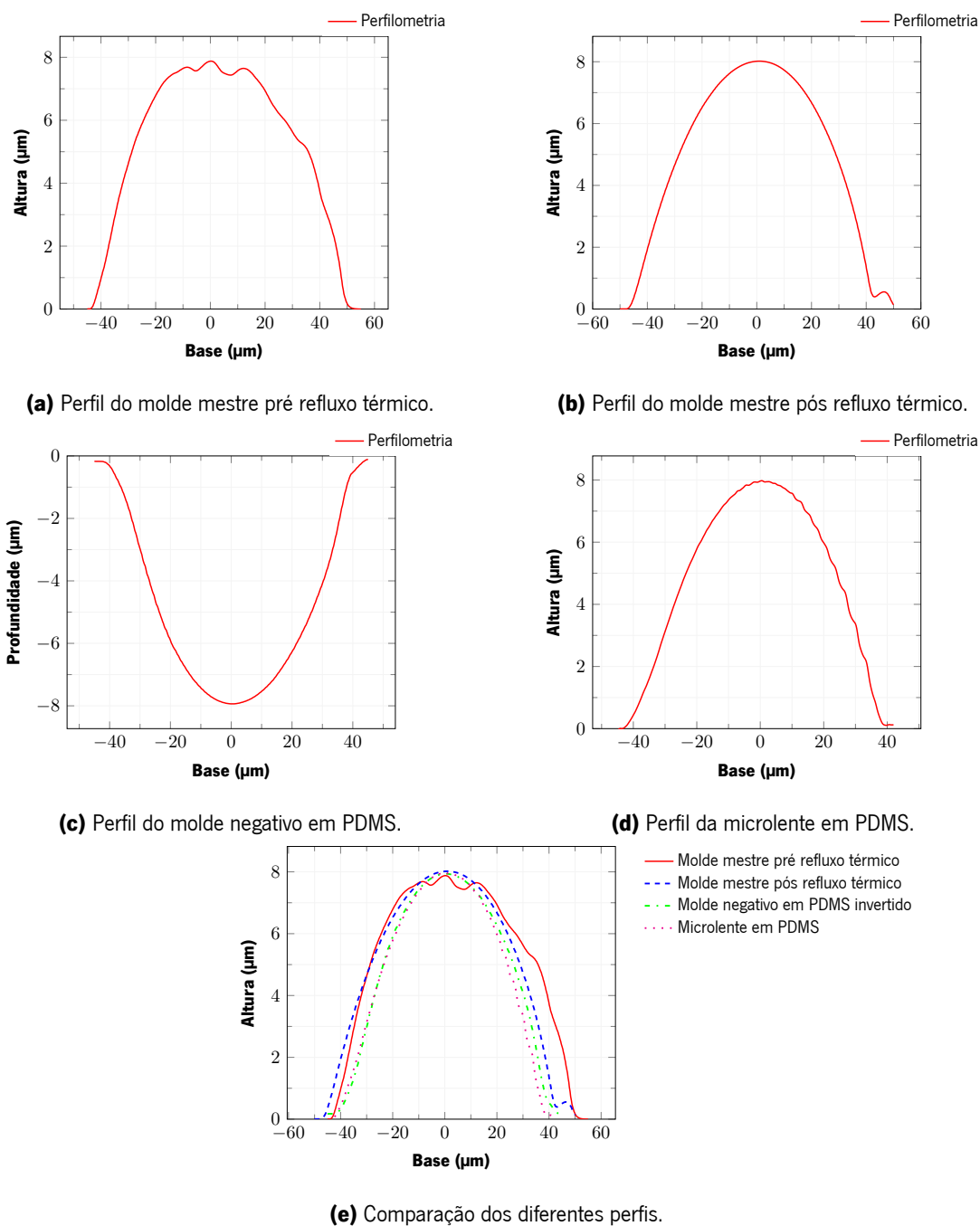


Figura 5.1: Perfilometria de contacto das diferentes estruturas fabricadas (molde mestre, molde negativo e microlente em PDMS) a partir dos polímeros fotossensíveis AZ[®] 4562 e AZ[®] 5214E.

Após a perfilometria de contacto, passou-se à caracterização por perfilometria ótica 3D, sendo os dados tratados e analisados no *software Gwyddion*. Após o tratamento dos dados das figuras 5.2a, 5.2b e 5.2c, representantes do molde mestre pré refluxo térmico, foram obtidas as dimensões de altura, 9,7 μm , e diâmetro, 80 μm . Foi também obtido um valor de rugosidade média (R_a) superficial de 349,68 nm do perfil da figura 5.2c e um valor de R_a superficial de 86,98 nm numa área de 25 μm^2 localizada no centro da superfície da figura 5.2a. Na figura 5.2d pode-se observar uma vista 3D incompleta do molde

mestre pós refluxo térmico. Devido às limitações da perfilometria ótica 3D, amostras que não refletem a luz na direção do sistema de aquisição de imagem, devido à curvatura do seu perfil ou transparência, não produzem uma imagem completa, o que acontece com o molde mestre pós refluxo térmico, molde negativo em PDMS e microlentes também em PDMS. No entanto, foi possível obter a altura de $9,8 \mu\text{m}$ e o diâmetro de $91,7 \mu\text{m}$ do molde mestre pré refluxo térmico.

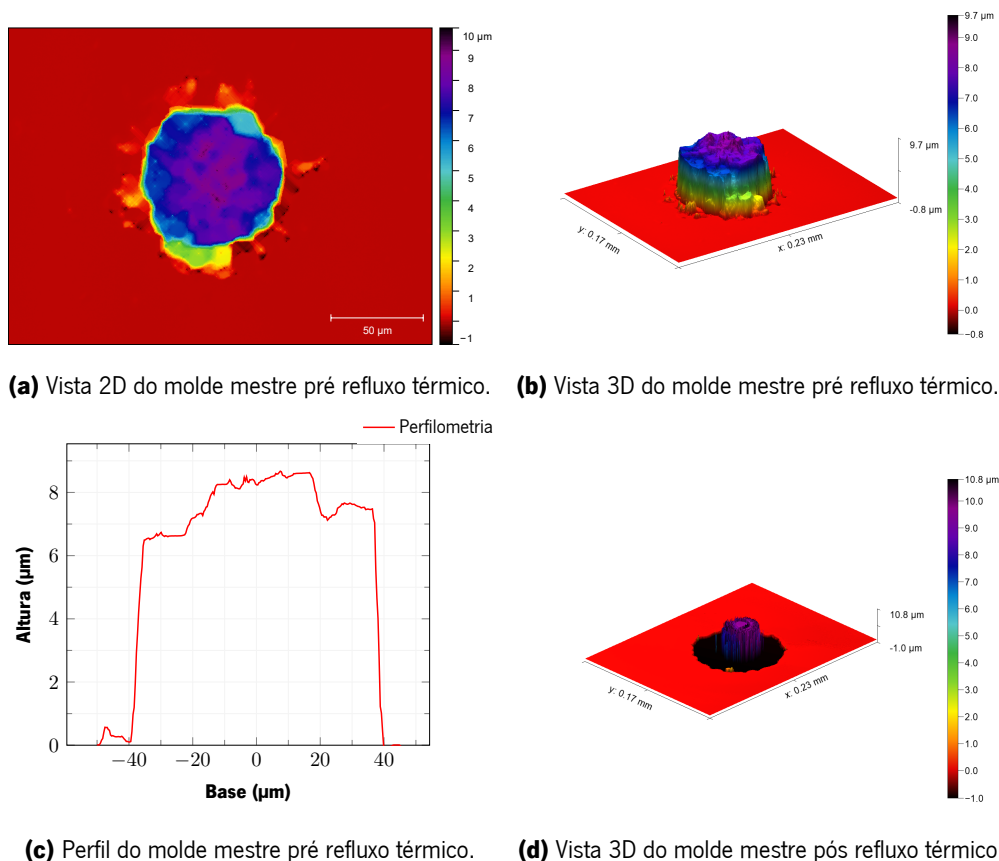


Figura 5.2: Perfilometria ótica 3D do molde mestre, pré e pós refluxo térmico, fabricados a partir dos polímeros fotossensíveis *AZ[®] 4562* e *AZ[®] 5214E*.

Devido aos resultados parciais obtidos por perfilometria ótica 3D, passou-se para uma caracterização com recurso a AFM, sendo que os dados foram novamente tratados e analisados no *software Gwyddion*. Após o tratamento dos dados da figura 5.3, foram obtidos uma altura média de $8,3 \mu\text{m}$ e um diâmetro médio de $80 \mu\text{m}$ para todas as estruturas caracterizadas. Foram obtidos valores de R_a superficial de $20,9 \text{ nm}$, $29,46 \text{ nm}$ e $14,9 \text{ nm}$ numa área de $25 \mu\text{m}^2$ das figuras 5.3a, 5.3b e 5.3c. Nos perfis das figuras 5.3d, 5.3e e 5.3f, os valores de R_a superficial obtidos foram de $25,9 \text{ nm}$, $20,16 \text{ nm}$ e $11,32 \text{ nm}$, respetivamente.

Nas figuras 5.3a, 5.3b e 5.3e podem ser observadas inclinações nos perfis das estruturas fabricadas. A inclinação da figura 5.3a deveu-se ao limite horizontal de medição do AFM de $90 \mu\text{m}$, o que levou a

uma análise parcial de um dos lados da amostra, parecendo assim haver uma inclinação. A inclinação das figuras 5.3b e 5.3e deveu-se aos limites de medições em profundidade do AFM, não conseguindo assim acompanhar corretamente o perfil descendente do molde negativo.

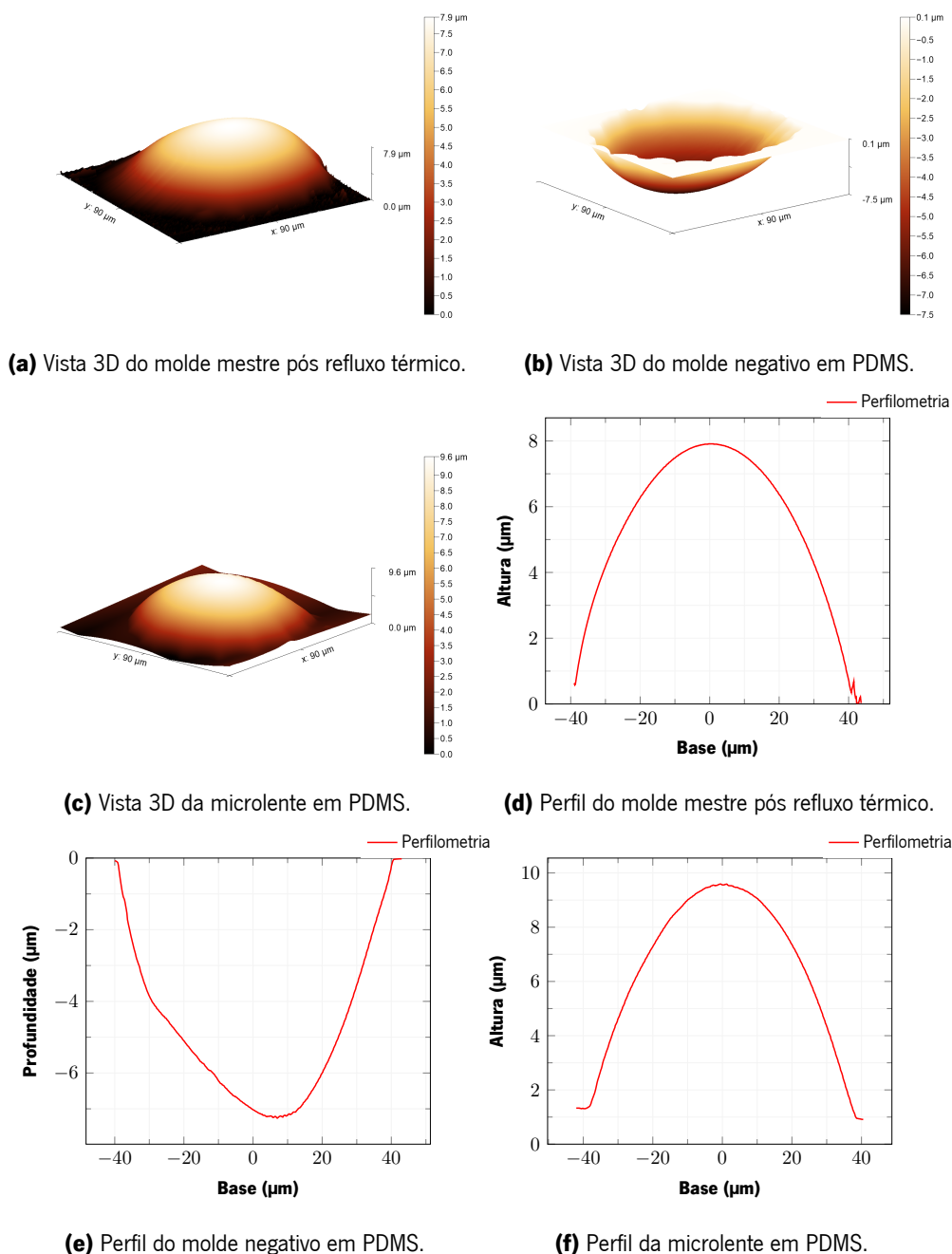


Figura 5.3: Análise AFM das diferentes estruturas fabricadas a partir dos polímeros fotossensíveis *AZ[®] 4562* e *AZ[®] 5214E*.

Para a visualização do aspeto geral do molde mestre, pré e pós refluxo térmico, com recurso a SEM, procedeu-se à pulverização catódica de uma camada condutora de ouro, com uma espessura de 8 nm, recorrendo a um alvo ouro/paládio (Au/Pd) 80/20, sendo a pulverização catódica realizada nos serviços

do SEMAT da Universidade do Minho. Pela análise da figura 5.4, pode-se verificar os efeitos do refluxo térmico e obter as dimensões do diâmetro médio das estruturas fabricadas, pré e pós refluxo térmico, de 91,39 μm e 91,41 μm respetivamente.

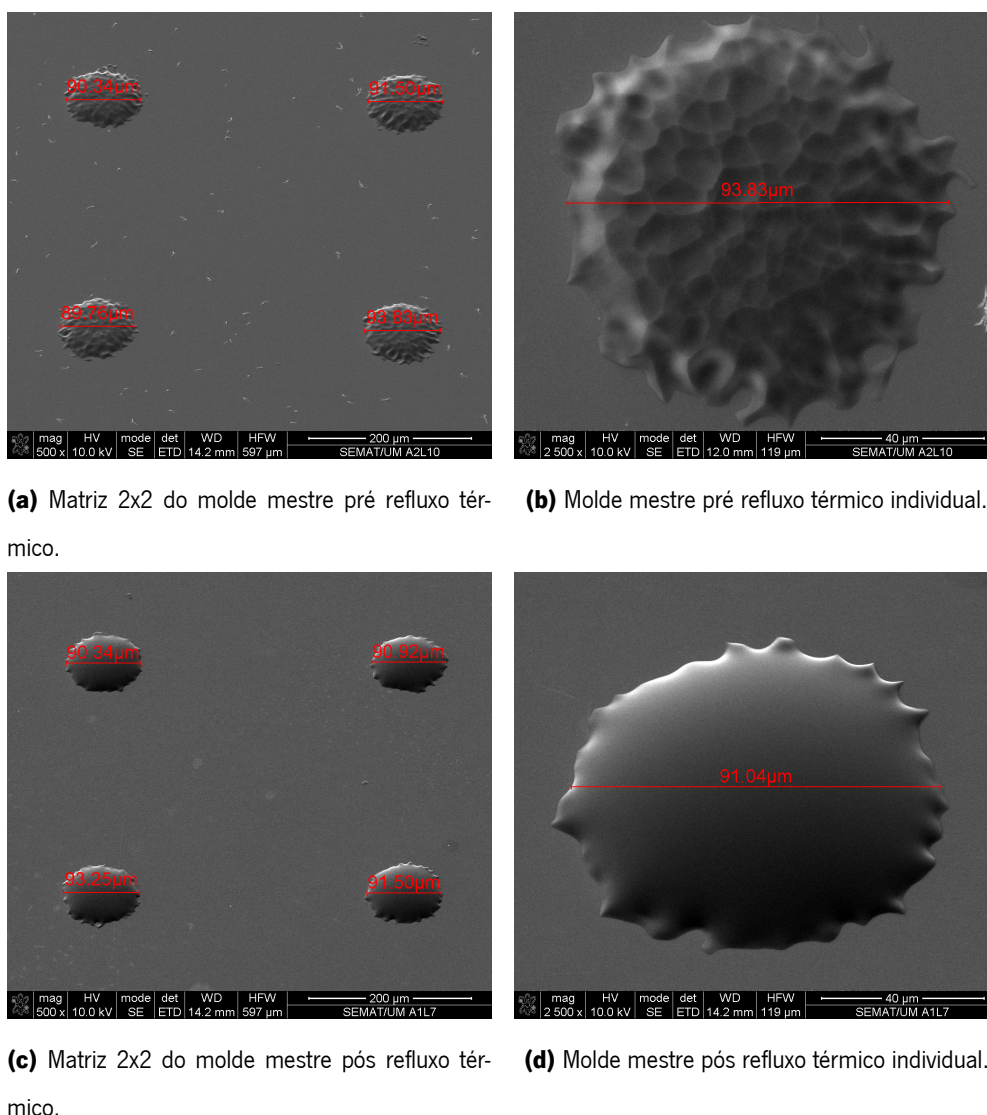


Figura 5.4: Imagens SEM do molde mestre, pré e pós refluxo térmico, fabricados a partir dos polímeros fotossensíveis AZ[®] 4562 e AZ[®] 5214E.

Após a caracterização física das diferentes estruturas fabricadas, passou-se para a caracterização ótica das microlentes em PDMS, efetuando-se cálculos baseados na Ótica Gaussiana. Partindo da equação 2.9 e considerando o tipo de lente plano-convexa ($R_1 = \infty$), as características óticas das microlentes [77], como o f (distância focal), NA (abertura numérica) e $f/\#$ (número focal), podem ser determinadas recorrendo às seguintes equações:

$$f = \frac{D^2 + 4h^2}{8h(n - 1)} \quad (5.1)$$

$$NA = \frac{D}{2f} \quad (5.2)$$

$$f/\# = \frac{f}{D} \quad (5.3)$$

As microlentes em PDMS fabricadas ($n = 1,4399$) fabricadas, com um diâmetro (D) de aproximadamente $80 \mu\text{m}$ e uma altura (h) de aproximadamente $8 \mu\text{m}$, possuem um $f = 236,42 \mu\text{m}$, $NA = 0,17$ e um $f/2,955$.

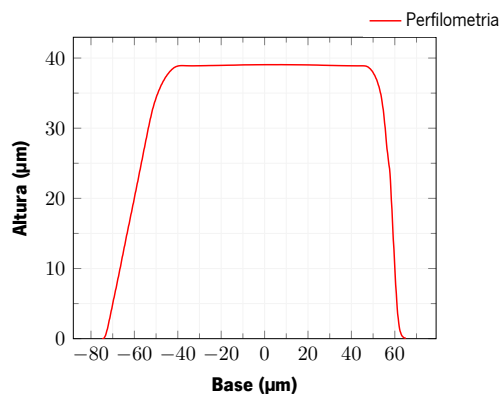
Comparativamente aos resultados obtidos na secção 3.2.1, o resultado da distância focal experimental é superior ao valor de simulação, uma vez que a microlente fabricada apresenta uma altura inferior e um diâmetro superior aos valores usados na simulação. Além disso, as simulações retratam sempre as condições ideais e a equação 5.1 é obtida através da aproximação da Ótica Gaussiana.

5.2 Resultados Obtidos com os Polímeros Fotosensíveis **AZ[®] 40 XT e AZ[®] MIR 701**

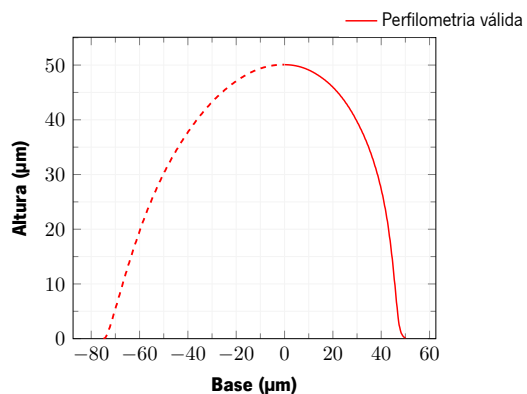
Com a caracterização efetuada na secção 5.1, passou-se à caracterização das estruturas fabricadas a partir dos polímeros fotosensíveis **AZ[®] 40 XT** e **AZ[®] MIR 701**, através dos métodos de perfilometria de contacto, perfilometria ótica 3D, AFM e SEM.

Na figura 5.5, pode-se observar os resultados obtidos com a perfilometria de contacto. Ao analisar a figura 5.5a, pode-se observar um artefacto de análise topográfica, descrito na secção 4.2.1. Este artefacto deve-se à razão altura/largura elevada do pilar, para as dimensões do estilete usado, o que faz com que parte dos resultados da perfilometria de contacto sejam inválidos. Para se obter o perfil correto do molde mestre pós refluxo térmico, este foi analisado nas direções Sul/Norte (S/N), Este/Oeste (E/O), Norte/Sul (N/S) e Oeste/Este (O/E), obtendo assim uma perfilometria válida em diferentes direções (figuras 5.5b, 5.5c, 5.5d e 5.5e), descartando assim os resultados representados a tracejado. Nos casos em que foi efetuada perfilometria de contacto ao molde negativo (figura 5.5f) e às microlentes em PDMS (figuras 5.5g, 5.5h, 5.5i e 5.5j), os artefactos de análise topográfica são ainda mais acentuados, devido à flexibilidade do PDMS e à força aplicada pelo estilete. No caso da figura 5.5f, o único dado a reter é a profundidade máxima do molde mestre pós refluxo térmico. Para análise da microlente em PDMS, foram realizadas perfilometrias nas mesmas direções que no molde mestre pós refluxo térmico, descartando os resultados a tracejado. Através da análise dos dados da figura 5.5, verifica-se que o perfil, o diâmetro de

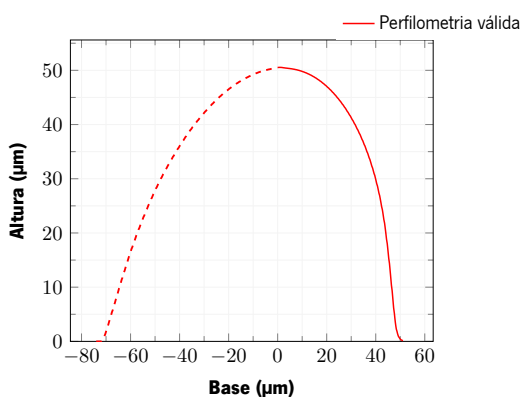
aproximadamente 100 μm e a altura de aproximadamente 50 μm são mantidos ao longo do processo.



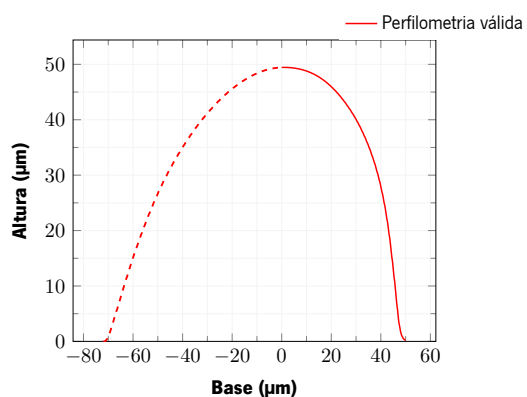
(a) Perfil do molde mestre pré refluxo térmico.



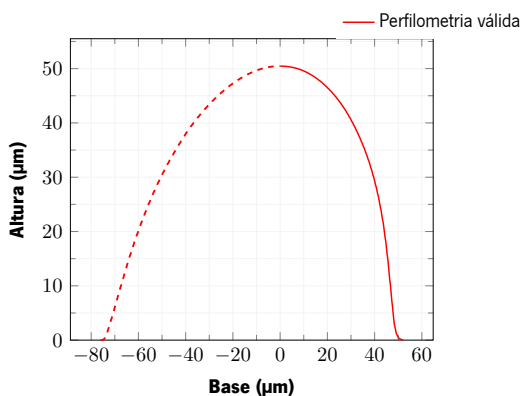
(b) Perfil do molde mestre pós refluxo térmico, direção S/N.



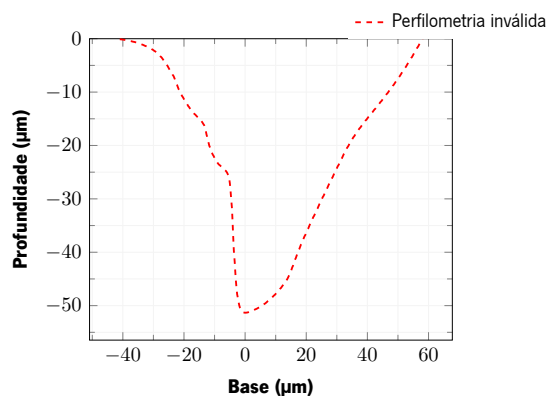
(c) Perfil do molde mestre pós refluxo térmico, direção E/O.



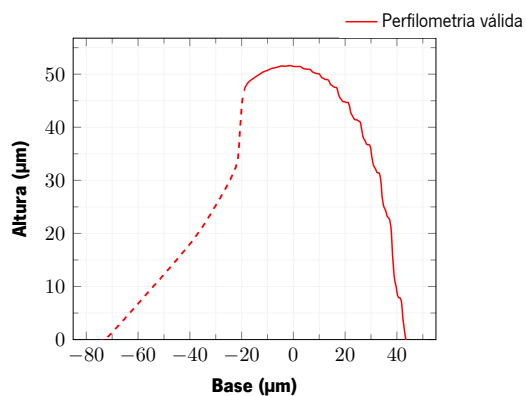
(d) Perfil do molde mestre pós refluxo térmico, direção N/S.



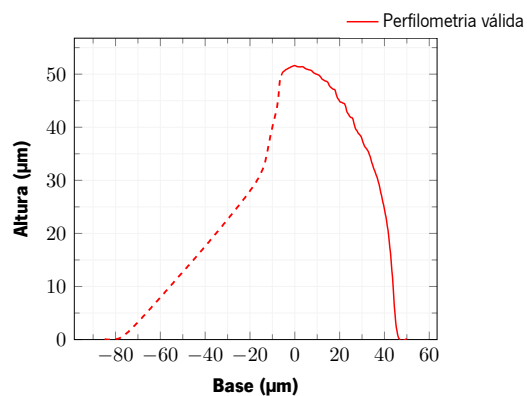
(e) Perfil do molde mestre pós refluxo térmico, direção O/E.



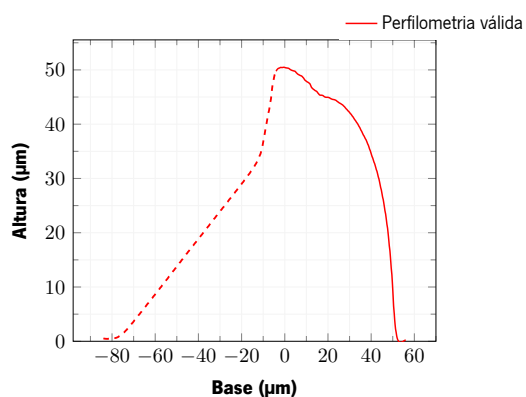
(f) Perfil do molde negativo em PDMS.



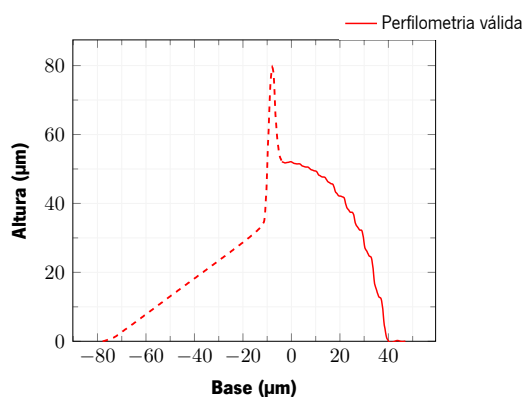
(g) Perfil da microlente em PDMS, direção S/N.



(h) Perfil da microlente em PDMS, direção E/O.



(i) Perfil da microlente em PDMS, direção N/S.



(j) Perfil da microlente em PDMS, direção O/E.

Figura 5.5: Perfilometria de contacto das diferentes estruturas fabricadas a partir dos polímeros fotossensíveis *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701*.

Com a perfilometria de contacto finalizada, passou-se para a perfilometria ótica 3D. Sabendo das limitações deste tipo de perfilometria, foi apenas possível realizar uma análise, num dos primeiros moldes mestres pré refluxo térmico fabricados, onde se pode retirar a altura do molde mestre pré refluxo térmico de 42,6 µm (figura 5.6).

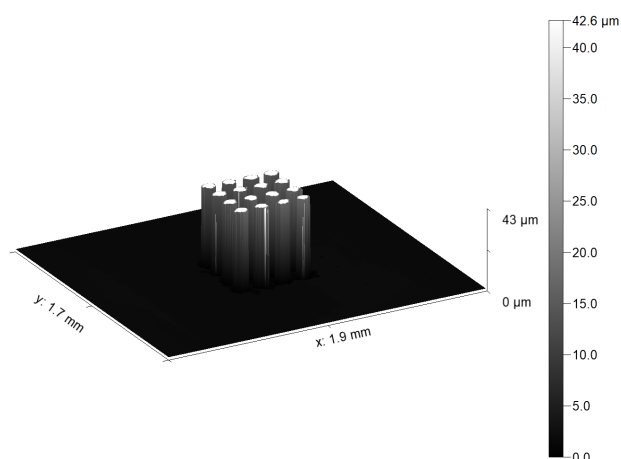
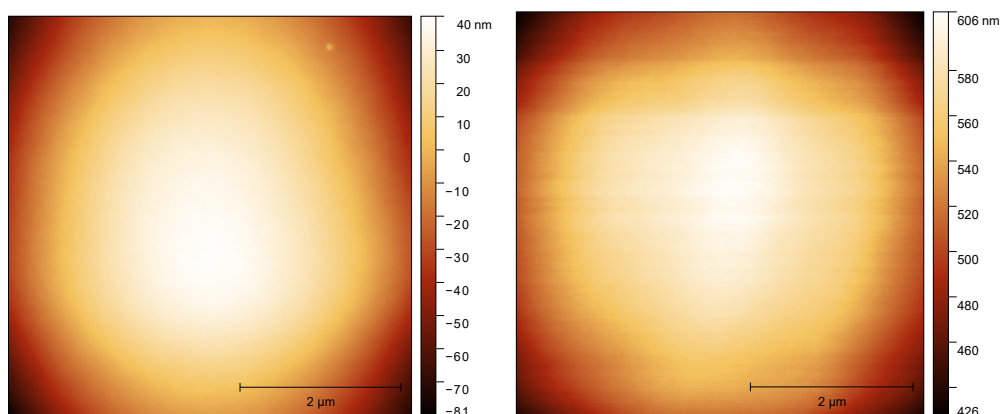


Figura 5.6: Perfilometria ótica 3D do molde mestre pré refluxo térmico, fabricado a partir dos polímeros fotossensíveis *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701*.

Devido às limitações da perfilometria ótica 3D, passou-se para uma caracterização com recurso a AFM da R_a superficial. Não foi analisado o perfil completo das várias estruturas fabricadas devido ao limite de medição vertical do AFM de 15 μm . Para a obtenção dos valores da R_a superficial foram analisadas áreas de 25 μm^2 no centro da superfície do molde mestre pós refluxo térmico (figura 5.7a) e da microlente em PDMS (figura 5.7b). Não foi possível obter um valor de R_a superficial do molde negativo em PDMS devido ao estilete do AFM não conseguir alcançar o fundo do molde negativo. O valor da R_a superficial do molde mestre pós refluxo obtido foi de 20,99 nm e da microlente em PDMS foi de 30,379 nm.

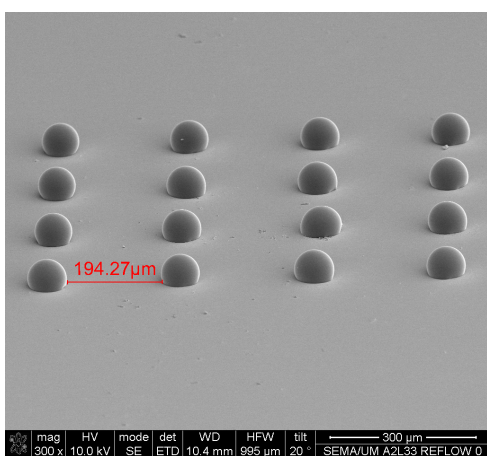


(a) Vista 2D de uma área de 25 μm^2 do molde mestre pós refluxo térmico. **(b)** Vista 2D de uma área de 25 μm^2 de uma microlente em PDMS.

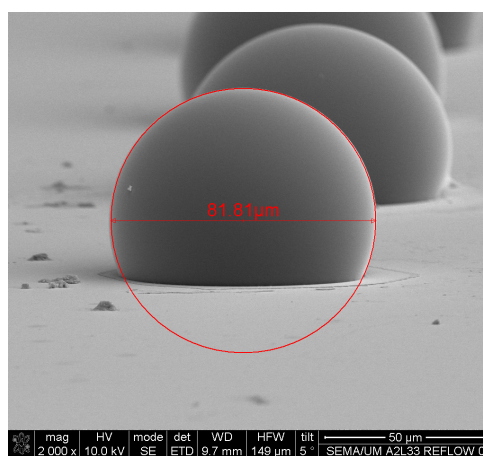
Figura 5.7: Análise AFM do molde mestre pós refluxo térmico e da microlente em PDMS, fabricados a partir dos polímeros fotossensíveis *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701*.

Para a finalização da caracterização, realizaram-se análises SEM ao molde mestre pós refluxo e às microlentes em PDMS, para uma visualização do aspeto geral. Através da comparação dos resultados

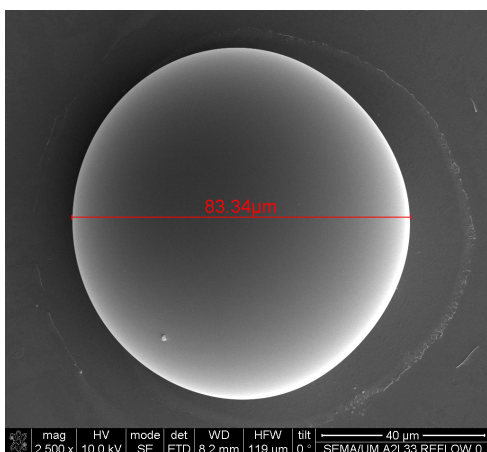
obtidos nas figuras 5.8a, 5.8b, 5.8c e 5.8d, com os obtidos nas figuras 5.4c e 5.4d, verifica-se que as estruturas fabricadas no molde mestre possuem agora uma base muito melhor definida. Pode também ser observado, nas figuras 5.8e, 5.8f, 5.8g e 5.8h, o resultado final das microlentes em PDMS fabricadas, sendo detetadas algumas imperfeições nas suas bases e algumas microlentes que não resistiram ao processo final de desmoldagem PDMS/PDMS. Estes problemas devem-se à profundidade elevada do molde negativo, ao facto da superfície do molde negativo não ser tratada com uma camada anti-aderente e por fim, ao material das microlentes ser o mesmo material do molde negativo. Contudo, verifica-se que a superfície das microlentes em PDMS foi replicada do molde mestre pós refluxo térmico com sucesso, com um diâmetro de $80,66\ \mu\text{m}$ e uma altura de $54,64\ \mu\text{m}$.



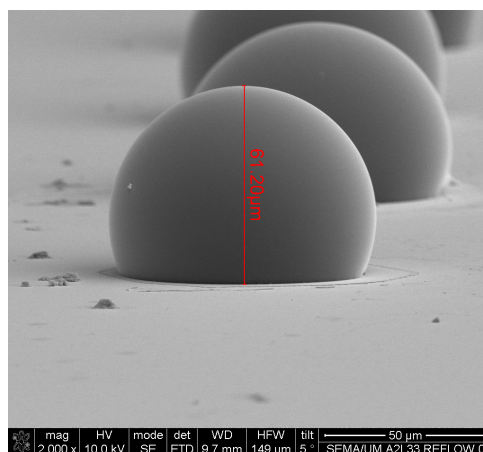
(a) Matriz 4x4 do molde mestre pós refluxo térmico.



(b) Molde mestre pós refluxo térmico individual.



(c) Molde mestre pós refluxo térmico individual.



(d) Molde mestre pós refluxo térmico individual.

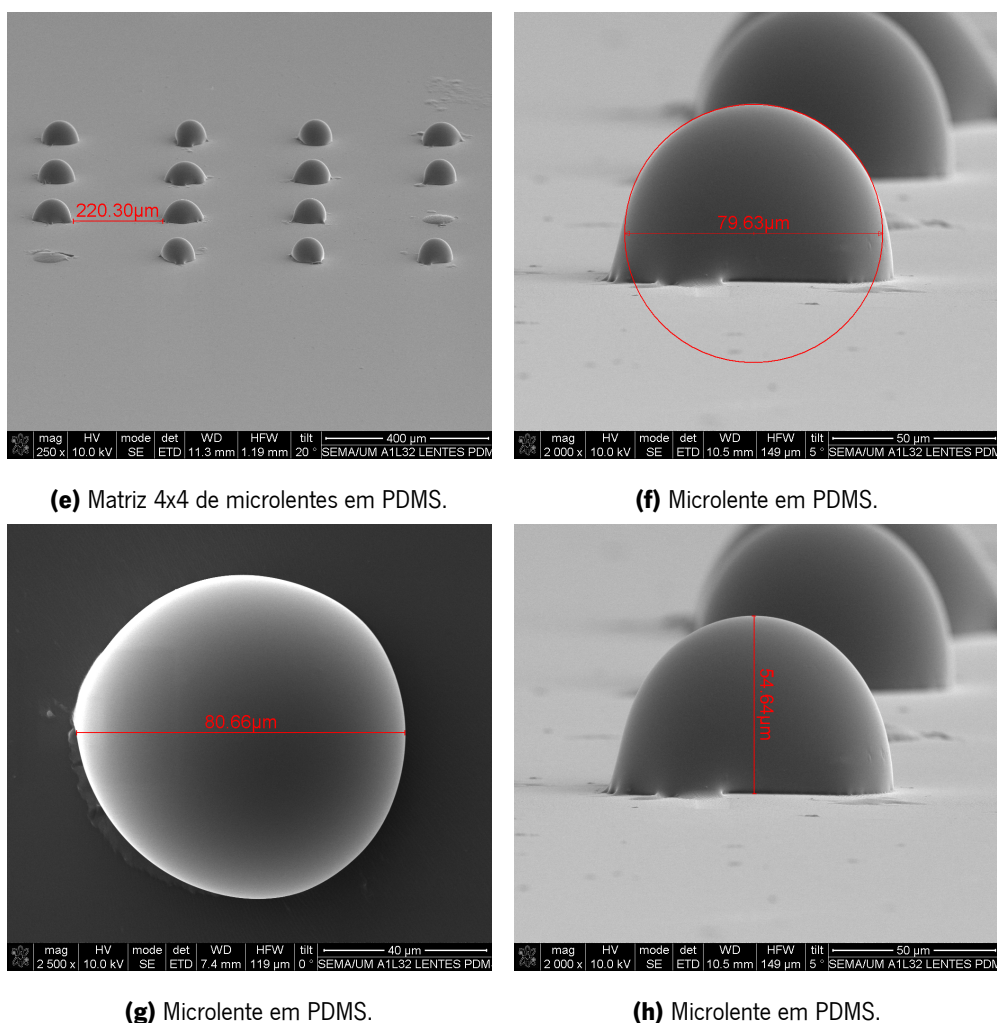


Figura 5.8: Imagens SEM do molde mestre pós refluxo térmico e microlentes em PDMS, fabricados a partir dos polímeros fotossensíveis *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701*.

Com a concretização da caracterização física das diferentes estruturas fabricadas, as microlentes em PDMS foram caracterizadas ópticamente, efetuando-se mais uma vez um conjunto de cálculos baseados na Ótica Gaussiana, equações 5.1, 5.2 e 5.3. Considerando um $n = 1,4399$ do PDMS, um diâmetro (D) de $80,66 \mu\text{m}$ e uma altura (h) de $54,64 \mu\text{m}$, obtém-se uma f (distância focal) de $95,94 \mu\text{m}$, uma NA (abertura numérica) de $0,42$ e um $f/\#$ (número focal) de $f/1,189$.

Comparativamente aos resultados obtidos na seção 3.2.2, o resultado da distância focal experimental é ligeiramente superior ao valor de simulação, uma vez que a microlente fabricada apresenta uma altura e um diâmetro superiores aos valores usados na simulação. Além disso, as simulações retratam sempre as condições ideais e a equação 5.1 é obtida através da aproximação da Ótica Gaussiana.

Na figura 5.9, pode ser visto o resultado de uma experiência com as microlentes em PDMS. Através da incidência de um laser nas microlentes em PDMS, foram criados padrões de interferência a 2 m de distância, com a disposição das estruturas fabricadas, devido ao efeito de refração criado pelas mesmas.

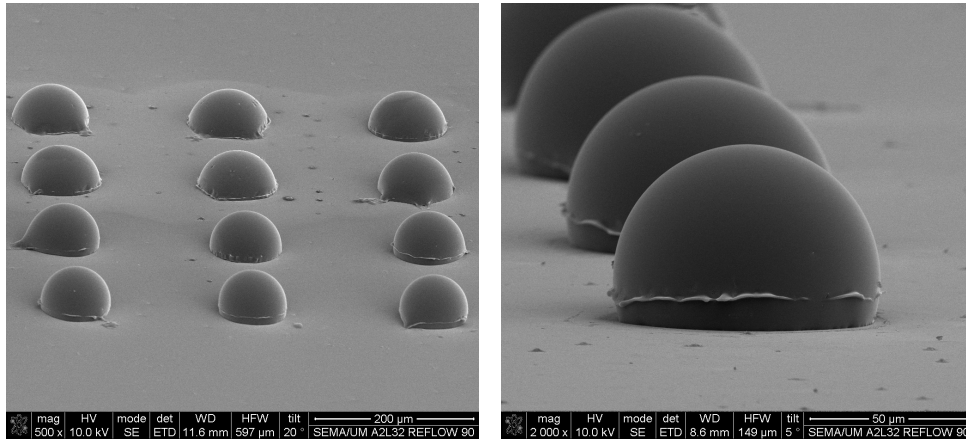


Figura 5.9: Padrões de interferência criados através da incidência de um laser nas microlentes em PDMS, fabricadas a partir dos polímeros fotossensíveis *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701*.

5.3 Resultados Obtidos com os Polímeros Fotossensíveis *AZ[®] 40 XT* + *AZ[®] MIR 701* e com Inclinação

Após o fabrico das microlentes em PDMS simétricas, tentou-se fabricar microlentes assimétricas, aplicando o método desenvolvido por Hung *et al.* [53]. Com o fabrico do molde mestre pós refluxo térmico e com uma inclinação aplicada de 90°, partiu-se para uma análise SEM com intuito de verificar a deslocação do vértice das microlentes fabricadas a partir dos polímeros fotossensíveis *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701*.

Através da análise da figura 5.10 e comparação com a figura 2.6, pode-se concluir que a criação de um molde mestre para o fabrico de microlentes assimétricas não foi realizado com sucesso, segundo a técnica proposta por Hung *et al.* [53]. Uma das possibilidades desta técnica não ter sido bem sucedida deve-se ao tempo necessário para a realização do refluxo térmico do polímero fotossensível *AZ[®] 4620* (usado por Hung *et al.*), que é dez vezes superior ao tempo necessário para a realização do refluxo térmico do polímero fotossensível *AZ[®] 40 XT*. Devido ao *AZ[®] 40 XT* ser extremamente sensível à temperatura e efetuar o refluxo térmico inclinado acima da T_g em apenas 1 minuto, o efeito da força gravítica não foi o suficiente para ocorrer a deslocação do vértice da microlente.



(a) Matriz 4x4 do molde mestre pós refluxo térmico com inclinação aplicada de 90°.

(b) Molde mestre pós refluxo térmico individual com inclinação aplicada de 90°.

Figura 5.10: Imagens SEM do molde mestre pós refluxo térmico com inclinação aplicada de 90°, fabricadas a partir dos polímeros fotossensíveis *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701*.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

Este capítulo apresenta as principais conclusões obtidas com a realização desta dissertação. Para terminar, são apresentadas as principais perspectivas de trabalho futuro.

6.1 Conclusões

O foco do trabalho desenvolvido durante esta dissertação foi a simulação, o desenvolvimento e a caracterização de microlentes capazes de colimar a luz, usando as técnicas de microfabricação disponíveis no laboratório.

Através da simulação de microlentes em PDMS com uma altura de 10 μm e um diâmetro de 75 μm , chegou-se à conclusão que uma microlente com estas características, não conseguiria colimar a luz. Devido a este resultado, partiu-se para a simulação de uma microlente em PDMS com uma altura de 40 μm e um diâmetro de 75 μm . Com estas novas dimensões, uma matriz de microlentes em PDMS utilizada em conjunto com um microLED, não só garante o requisito mínimo optogenético de 1 mW/mm^2 , como é capaz de colimar a luz. Foi também simulada uma microlente assimétrica em PDMS, baseada na microlente desenvolvida por Hung *et al.* [53], verificando-se que a luz é parcialmente colimada e direcionada na direção oposta da deslocação do vértice da microlente.

Paralelamente às simulações, foram fabricadas microlentes em PDMS através do seguinte processo: (i) criação de um molde mestre com recurso a fotolitografia e refluxo térmico dos polímeros fotossensíveis AZ[®] 4562 e AZ[®] 5214E, (ii) criação de um molde negativo em PDMS com base no molde mestre e (iii) criação final das microlentes em PDMS através do molde negativo em PDMS. Após o fabrico, a caracterização física das microlentes revelou uma altura aproximada de 8 μm , um diâmetro aproximado

de 80 μm e uma rugosidade média superficial aproximada de 15 nm. A nível de caracterização ótica, recorrendo a cálculos baseados na Ótica Gaussiana, foram obtidas as seguintes características: uma distância focal de 236,42 μm , uma abertura numérica de 0,17 e um número focal de 2,955. A distância focal calculada é superior ao valor simulado (143 μm), uma vez que as microlentes fabricadas apresentam uma altura inferior e um diâmetro superior aos valores usados nas simulações. Além disso, as simulações retratam sempre as condições ideais e os valores calculados são obtidos através da aproximação da Ótica Gaussiana. Como referido anteriormente, através da simulação FEM destas microlentes em PDMS conclui-se que estas não cumprem o requisito de colimação da luz azul emitida pelo microLED devido às dimensões da microlente. No entanto, o seu fabrico e caracterização foram essenciais para a otimização do processo de fabrico das microlentes em PDMS fabricadas posteriormente.

O novo processo de fabrico envolveu a criação de um novo molde mestre, com recurso a fotolitografia e refluxo térmico dos polímeros fotossensíveis *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701*, a criação do molde negativo em PDMS e a criação final das microlentes em PDMS. A caracterização física das microlentes revelou uma altura aproximada de 55 μm , um diâmetro aproximado de 81 μm e uma rugosidade média superficial aproximada de 30 nm. Devido à profundidade elevada do molde negativo, da superfície deste não ter sido tratada com uma camada anti-aderente e do material das microlentes ser o mesmo que o material do molde, a base das microlentes contém algumas irregularidades e algumas microlentes foram destruídas durante a desmoldagem final. Contudo, a superfície das microlentes, sendo esta a sua característica física mais importante, foi replicada com sucesso do molde mestre. Mais uma vez, a caracterização ótica recorrendo a cálculos baseados na Ótica Gaussiana, permitiu obter as seguintes características: uma distância focal de 95,94 μm , uma abertura numérica de 0,42 e um número focal de 1,189. A distância focal calculada é ligeiramente superior ao valor simulado (68 μm), uma vez que as microlentes fabricadas apresentam uma altura e diâmetro superiores aos valores usados nas simulações. Além disso, as simulações retratam sempre as condições ideais e os valores calculados são obtidos através da aproximação da Ótica Gaussiana. É ainda importante referir que estas microlentes em PDMS cumprem o requisito de colimação da luz azul emitida por um microLED com ângulo de emissão de 34°, como comprovado nas simulações FEM.

Tentou-se também o fabrico de um molde mestre capaz de produzir microlentes assimétricas, segundo o método proposto por Hung *et al.* [53]. Após o molde mestre ser fabricado com recurso a refluxo térmico com inclinação de 90°, foi verificado por análise SEM que não houve deslocação do vértice da estrutura. Assim, com este método proposto não foi possível o fabrico de microlentes assimétricas, com recurso a refluxo térmico com inclinação dos polímeros fotossensíveis *AZ[®] 40 XT* e *AZ[®] MIR 701*. Tal

resultado pode estar relacionado com a sensibilidade do polímero fotossensível *AZ[®] 40 XT* à temperatura e ao facto de este efetuar o refluxo térmico em apenas 1 minuto.

6.2 Trabalho Futuro

Após o trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação, sugere-se várias etapas adicionais, algumas relacionadas com uma caracterização ótica mais completa das microlentes em PDMS fabricadas, outras com o processo de fabrico das microlentes.

A primeira sugestão de trabalho futuro é a determinação experimental da distância focal das microlentes fabricadas em PDMS, recorrendo à montagem de um *setup* ótico experimental adequado para a medição.

Um teste experimental que também poderá ser realizado no futuro é a medição dos valores de irradiação do microLED, com e sem microlente, de forma a comprovar experimentalmente a eficiência das microlentes fabricadas em PDMS.

Além disso, sugere-se o desenvolvimento de um novo processo de microfabricação de um molde mestre em polímero fotossensível. Este novo molde mestre poderá ser fabricado através de técnicas por escrita direta em escala de cinzento [55, 78]. Com esta nova abordagem, será possível fabricar moldes mestres côncavos para a obtenção de microlentes simétricas e assimétricas, com diferentes valores de inclinação, sem recorrer ao refluxo térmico do polímero fotossensível e a moldes negativos em PDMS sem tratamento anti-aderente.

Por fim, no futuro será importante estudar e programar a integração das microlentes no microLED soldado na sonda neuronal.

Bibliografia

- [1] C. Watson, M. Kirkcaldie, and G. Paxinos, *The Brain: An Introduction to Functional Neuroanatomy*, 1st ed. Academic Press, 2010.
- [2] H. Wittchen, F. Jacobi, J. Rehm, A. Gustavsson, M. Svensson, B. Jönsson, J. Olesen, C. Allgulander, J. Alonso, C. Faravelli, L. Fratiglioni, P. Jennum, R. Lieb, A. Maercker, J. van Os, M. Preisig, L. Salvador-Carulla, R. Simon, and H.-C. Steinhausen, "The size and burden of mental disorders and other disorders of the brain in Europe 2010," *European Neuropsychopharmacology*, vol. 21, no. 9, pp. 655–679, sep 2011.
- [3] WHO, "Mental disorders," [Online]. Available: <http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders>, last accessed on 2019-11-28.
- [4] B. Franklin, "LIX. An account of the effects of electricity in paralytic cases. In a letter to John Pringle, M. D. F. R. S. from Benjamin Franklin, Esq; F. R. S.," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 50, pp. 481–483, jan 1757.
- [5] A. L. Hodgkin and A. F. Huxley, "Action Potentials Recorded from Inside a Nerve Fibre," *Nature*, vol. 144, no. 3651, pp. 710–711, oct 1939.
- [6] —, "A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve," *The Journal of Physiology*, vol. 117, no. 4, pp. 500–544, aug 1952.
- [7] M. HajjHassan, V. Chodavarapu, and S. Musallam, "NeuroMEMS: Neural Probe Microtechnologies," *Sensors*, vol. 8, no. 10, pp. 6704–6726, oct 2008.
- [8] F. Strumwasser, "Long-Term Recording from Single Neurons in Brain of Unrestrained Mammals," *Science*, vol. 127, no. 3296, pp. 469–470, feb 1958.
- [9] M. A. L. Nicolelis, *Methods for Neural Ensemble Recordings*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, dec 2007.

-
- [10] K. D. Wise, J. B. Angell, and A. Starr, "An Integrated-Circuit Approach to Extracellular Microelectrodes," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. BME-17, no. 3, pp. 238–247, 1970.
- [11] K. Najafi, K. Wise, and T. Mochizuki, "A high-yield IC-compatible multichannel recording array," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 32, no. 7, pp. 1206–1211, jul 1985.
- [12] K. Wise, A. Sodagar, Ying Yao, M. Gulari, G. Perlin, and K. Najafi, "Microelectrodes, Microelectronics, and Implantable Neural Microsystems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 7, pp. 1184–1202, jul 2008.
- [13] P. K. Campbell, K. E. Jones, R. J. Huber, K. W. Horch, and R. A. Normann, "A Silicon-Based, Three-Dimensional Neural Interface: Manufacturing Processes for an Intracortical Electrode Array," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 38, no. 8, pp. 758–768, 1991.
- [14] A. N. Badi, T. R. Kertesz, R. K. Gurgel, C. Shelton, and R. A. Normann, "Development of a novel eighth-nerve intraneural auditory neuroprosthesis," *Laryngoscope*, vol. 113, no. 5, pp. 833–842, 2003.
- [15] A. L. Benabid, "Deep brain stimulation of the subthalamic nucleus for the treatment of Parkinson's disease," *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 13, no. 6, pp. 696–706, 2003.
- [16] E. S. Boyden, F. Zhang, E. Bamberg, G. Nagel, and K. Deisseroth, "Millisecond-timescale, genetically targeted optical control of neural activity," *Nature Neuroscience*, vol. 8, no. 9, pp. 1263–1268, sep 2005.
- [17] K. Deisseroth, G. Feng, A. K. Majewska, G. Miesenbock, A. Ting, and M. J. Schnitzer, "Next-Generation Optical Technologies for Illuminating Genetically Targeted Brain Circuits," *Journal of Neuroscience*, vol. 26, no. 41, pp. 10 380–10 386, oct 2006.
- [18] É. Ádám, A. Hajdu, F. Nagy, and A. Viczián, "Acta biologica szegediensis," vol. 59, 2015, pp. 105–119.
- [19] K. Deisseroth, "Optogenetics," *Nature Methods*, vol. 8, no. 1, pp. 26–29, jan 2011.
- [20] F. Wu, E. Stark, P.-C. Ku, K. D. Wise, G. Buzsáki, and E. Yoon, "Monolithically Integrated μ LEDs on Silicon Neural Probes for High-Resolution Optogenetic Studies in Behaving Animals," *Neuron*, vol. 88, no. 6, pp. 1136–1148, dec 2015.

- [21] X. Han and E. S. Boyden, "Multiple-Color Optical Activation, Silencing, and Desynchronization of Neural Activity, with Single-Spike Temporal Resolution," *PLoS ONE*, vol. 2, no. 3, p. e299, mar 2007.
- [22] S. B. Gonçalves, J. F. Ribeiro, A. F. Silva, R. M. Costa, and J. H. Correia, "Design and manufacturing challenges of optogenetic neural interfaces: a review," *Journal of Neural Engineering*, vol. 14, no. 4, p. 041001, aug 2017.
- [23] M. Schwaerzle, K. Seidl, U. T. Schwarz, O. Paul, and P. Ruther, "Ultracompact optrode with integrated laser diode chips and SU-8 waveguides for optogenetic applications," *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, pp. 1029–1032, 2013.
- [24] S. Gonçalves, J. Palha, H. Fernandes, M. Souto, S. Pimenta, T. Dong, Z. Yang, J. Ribeiro, and J. Correia, "LED Optrode with Integrated Temperature Sensing for Optogenetics," *Micromachines*, vol. 9, no. 9, p. 473, sep 2018.
- [25] N. Grossman, V. Poher, M. S. Grubb, G. T. Kennedy, K. Nikolic, B. McGovern, R. B. Palmieri, Z. Gong, E. M. Drakakis, M. A. Neil, M. D. Dawson, J. Burrone, and P. Degenaar, "Multi-site optical excitation using ChR2 and micro-LED array," *Journal of Neural Engineering*, vol. 7, no. 1, 2010.
- [26] K. Tamura, Y. Ohashi, T. Tsubota, D. Takeuchi, T. Hirabayashi, M. Yaguchi, M. Matsuyama, T. Sekine, and Y. Miyashita, "A glass-coated tungsten microelectrode enclosing optical fibers for optogenetic exploration in primate deep brain structures," *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 211, no. 1, pp. 49–57, 2012.
- [27] I. J. Cho, H. W. Baac, and E. Yoon, "A 16-site neural probe integrated with a waveguide for optical stimulation," *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, pp. 995–998, 2010.
- [28] A. Y. Mogilner, A. L. Benabid, and A. R. Rezai, "Brain stimulation: Current applications and future prospects," *Thalamus and Related Systems*, vol. 1, no. 3, pp. 255–267, 2001.
- [29] S. K. Mohanty and V. Lakshminarayanan, "Optical techniques in optogenetics," *Journal of Modern Optics*, vol. 62, no. 12, pp. 949–970, 2015.
- [30] H. Wang, B. Wang, K. P. Normoyle, K. Jackson, K. Spitler, M. Sharrock, C. M. Miller, C. Best, D. Llano, and R. Du, "Brain temperature and its fundamental properties: A review for clinical neuroscientists," *Frontiers in Neuroscience*, vol. 8, no. SEP, pp. 1–17, 2014.

-
- [31] J. Haveman, P. Sminia, J. Wondergem, J. van der Zee, and M. C. Hulshof, "Effects of hyperthermia on the central nervous system: What was learnt from animal studies?" *International Journal of Hyperthermia*, vol. 21, no. 5, pp. 473–487, 2005.
- [32] C. Childs, "Human brain temperature: regulation, measurement and relationship with cerebral trauma: Part 1," *British Journal of Neurosurgery*, vol. 22, no. 4, pp. 486–496, jan 2008.
- [33] C. T Wass, W. L Lanier, R. Hofer, B. W Scheithauer, and G. Andrews, "Temperature Changes of Greater or Equal 1°C Alter Functional Neurologic Outcome and Histopathology in a Canine Model of Complete Cerebral Ischemia," *Anesthesiology*, vol. 83, pp. 325–35, 1995.
- [34] E. Hecht, *Optics*, 5th ed. Pearson Education, 2016.
- [35] R. Stevens and T. Miyashita, "Review of standards for microlenses and microlens arrays," *The Imaging Science Journal*, vol. 58, no. 4, pp. 202–212, aug 2010.
- [36] Z. D. Popovic, R. A. Sprague, and G. A. Neville Connell, "Technique for monolithic fabrication of microlens arrays," *Applied Optics*, vol. 27, no. 7, p. 1281, 1988.
- [37] Y. Hongbin, Z. Guangya, C. F. Siong, and L. Feiwen, "Simple Method for Fabricating Solid Microlenses With Different Focal Lengths," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 19, pp. 1624–1626, oct 2008.
- [38] S. T. Kowel, D. S. Cleverly, and P. G. Kornreich, "Focusing by electrical modulation of refraction in a liquid crystal cell," *Applied Optics*, vol. 23, no. 2, p. 278, 1984.
- [39] C. T. Pan, T. T. Wu, M. F. Chen, Y. C. Chang, C. J. Lee, and J. C. Huang, "Hot embossing of microlens array on bulk metallic glass," *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 141, no. 2, pp. 422–431, 2008.
- [40] Y. Ishii, S. Koike, Y. Arai, and Y. Ando, "Ink-jet fabrication of polymer microlens for optical-I/O chip packaging," *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, vol. 39, no. 3 B, pp. 1490–1493, 2000.
- [41] S. R. Berry, J. B. Stewart, T. A. Thorsen, and I. Guha, "Development of adaptive liquid microlenses and microlens arrays," in *MOEMS and Miniaturized Systems XII*, W. Piyawattanametha and Y.-H. Park, Eds., vol. 8616, mar 2013, p. 861610.

- [42] M. Oikawa, K. Iga, T. Sanada, N. Yamamoto, and K. Nishizawa, "Array of distributed-index planar micro-lenses prepared from ion exchange technique," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 20, no. 4, pp. L296–L298, 1981.
- [43] G. Du, Q. Yang, F. Chen, H. Liu, Z. Deng, H. Bian, S. He, J. Si, X. Meng, and X. Hou, "Direct fabrication of seamless roller molds with gapless and shaped-controlled concave microlens arrays," *Optics Letters*, vol. 37, no. 21, p. 4404, 2012.
- [44] K. Lee, W. Wagermaier, A. Masic, K. P. Kommareddy, M. Bennet, I. Manjubala, S. W. Lee, S. B. Park, H. Cölfen, and P. Fratzl, "Self-assembly of amorphous calcium carbonate microlens arrays," *Nature Communications*, vol. 3, 2012.
- [45] Z. J. Lian, S. Y. Hung, M. H. Shen, and H. Yang, "Rapid fabrication of semiellipsoid microlens using thermal reflow with two different photoresists," *Microelectronic Engineering*, vol. 115, pp. 46–50, 2014.
- [46] K. Totsu, K. Fujishiro, S. Tanaka, and M. Esashi, "Fabrication of three-dimensional microstructure using maskless gray-scale lithography," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 130-131, no. SPEC. ISS., pp. 387–392, aug 2006.
- [47] N. F. Borrelli, D. L. Morse, R. H. Bellman, and W. L. Morgan, "Photolytic technique for producing microlenses in photosensitive glass," *Applied Optics*, vol. 24, no. 16, p. 2520, 1985.
- [48] M. He, X. C. Yuan, N. Q. Ngo, J. Bu, and S. H. Tao, "Single-step fabrication of a microlens array in sol-gel material by direct laser writing and its application in optical coupling," *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, vol. 6, no. 1, pp. 94–97, 2004.
- [49] C. Zheng, A. Hu, K. D. Kihm, Q. Ma, R. Li, T. Chen, and W. W. Duley, "Femtosecond Laser Fabrication of Cavity Microball Lens (CMBL) inside a PMMA Substrate for Super-Wide Angle Imaging," *Small*, vol. 11, no. 25, pp. 3007–3016, 2015.
- [50] T. Hou, C. Zheng, S. Bai, Q. Ma, D. Bridges, A. Hu, and W. W. Duley, "Fabrication, characterization, and applications of microlenses," *Applied Optics*, vol. 54, no. 24, p. 7366, aug 2015.
- [51] J. F. Ribeiro, A. C. Costa, J. M. Gomes, C. G. Costa, S. B. Goncalves, R. F. Wolffenbuttel, and J. H. Correia, "PDMS Microlenses for Optical Biopsy Microsystems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 12, pp. 9683–9690, dec 2017.

- [52] T.-Y. Chang, C.-H. Hung, P.-S. Chang, M.-H. Yeh, and H. Yang, "Asymmetric focusing microlens array fabricated using off-axis lithography," *Microsystem Technologies*, vol. 19, no. 6, pp. 861–869, jun 2013.
- [53] S.-Y. Hung, T.-Y. Chang, M.-H. Shen, and H. Yang, "Tilted microlens fabrication method using two photoresists with different melting temperatures," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 24, no. 2, feb 2014.
- [54] T.-Y. Chang, C.-H. Hung, Z.-J. Lian, and H. Yang, "Using proximity exposure to produce asymmetrical lens for light control films," *Microsystem Technologies*, vol. 21, no. 9, pp. 1893–1901, sep 2015.
- [55] K. Zhong, Y. Gao, F. Li, Z. Zhang, and N. Luo, "Fabrication of PDMS microlens array by digital maskless grayscale lithography and replica molding technique," *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 125, no. 10, pp. 2413–2416, may 2014.
- [56] J. C. McDonald, D. C. Duffy, J. R. Anderson, and D. T. Chiu, "Review General Fabrication of microfluidic systems in poly (dimethylsiloxane)," *Review Literature And Arts Of The Americas*, 2000.
- [57] H. Sun, X. Wang, Y. Xiong, G. Liu, and K. Wang, "Fabrication of microlens based on overplating in electroforming," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 26, no. 5, 2016.
- [58] D. Kacik, P. Tatar, and I. Martincek, "Measurement of PDMS refractive index by low-coherence interferometry," in *2014 ELEKTRO*, no. 2. IEEE, may 2014, pp. 662–665.
- [59] A. S. Nezhad, M. Ghanbari, C. G. Agudelo, M. Packirisamy, R. B. Bhat, and A. Geitmann, "PDMS microcantilever-based flow sensor integration for lab-on-a-chip," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 601–609, 2013.
- [60] Xuefeng Zeng and Hongrui Jiang, "Polydimethylsiloxane Microlens Arrays Fabricated Through Liquid-Phase Photopolymerization and Molding," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 17, no. 5, pp. 1210–1217, oct 2008.
- [61] R. P. Rocha, M. S. Belsley, J. H. Correia, and J. P. Carmo, "Low f-number microlenses for integration on optical microsystems," *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 7, pp. 4073–4075, jul 2015.
- [62] "ELC-470-34 Datasheet," [Online]. Available: http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_chip/elc-470-34.pdf, last accessed on 2019-08-23.

- [63] "Radiometric vs. Photometric Units," [Online]. Available: <https://www.thorlabs.de/catalogPages/506.pdf>, last accessed on 2019-08-21.
- [64] A. E308, "Standard Practice for Computing the Colors of Objects by Using the CIE System," ASTM International, West Conshohocken, PA, Tech. Rep. November, 2001. [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/E308.htm>
- [65] "AZ 5214E," [Online]. Available: https://www.microchemicals.com/micro/tds_az_5214e_photoresist.pdf, last accessed on 2018-09-27.
- [66] "AZ 4500 Series," [Online]. Available: https://www.microchemicals.com/micro/tds_az_4500_series.pdf, last accessed on 2018-09-27.
- [67] "AZ ® 40XT-11D Photoresist Thick Positive Chemically Amplified Photoresist Lithographic Performance at 40µm," [Online]. Available: https://microchemicals.com/micro/tds_az_40xt_photoresist.pdf, last accessed on 2018-12-04.
- [68] A. S. H. Makhoul and I. Tiginyanu, *Nanocoatings and ultra-thin films - Technologies and Applications*, 1st ed. Woodhead Publishing, 2011.
- [69] S. Bhansali and A. Vasudev, *MEMS for Biomedical Applications*, 1st ed. Woodhead Publishing, 2012.
- [70] C. Koch and T. J. Rinke, *Photolithography: Basics of Microstructuring*, 1st ed. MicroChemicals GmbH, 2017.
- [71] "AZ MiR 701 Series," [Online]. Available: https://www.microchemicals.com/micro/tds_az_mir701_photoresist.pdf, last accessed on 2019-03-11.
- [72] Rui Pedro Leitão da Silva Rocha, "Microlenses for Optical Microsystems," Ph.D. thesis, Universidade do Minho, 2013.
- [73] D. Daly, *Microlens Arrays*, 1st ed. Taylor & Francis, 2001.
- [74] D. Malacara, *Optical Shop Testing*, 3rd ed. Wiley-Interscience, 2007.
- [75] J. Haus, *Fundamentals and Applications of Nanophotonics*, 1st ed. Elsevier, 2016.
- [76] P. Pavlicek, "Measurement Uncertainty of White-Light Interferometry on Optically Rough Surfaces," in *Numerical Simulations of Physical and Engineering Processes*. InTech, sep 2011, vol. i, p. 13.

- [77] S. Sinzinger and J. Jahns, *Microoptics*, 2nd ed. Wiley-VCH, 2003.
- [78] N. Luo and Z. Zhang, "Fabrication of a curved microlens array using double gray-scale digital maskless lithography," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 27, no. 3, p. 035015, mar 2017.